



UNIVERSIDADE DA CORUÑA

Desarrollo y aplicaciones del cultivo de *Saccharina latissima* (Laminariales, Ochrophyta) en sistemas de acuicultura multitrófica integrada (AMTI)

Tesis doctoral

José Ribamar da Cruz Freitas Júnior

A Coruña, marzo de 2015



UNIVERSIDADE DA CORUÑA

PROGRAMA DE DOCTORADO EN ACUICULTURA

**Desarrollo y aplicaciones del cultivo de *Saccharina latissima*
(Laminariales, Ochrophyta) en sistemas de acuicultura
multitrófica integrada (AMTI)**

Memoria que presenta

José Ribamar da Cruz Freitas Júnior

para optar al grado de doctor

Fdo. José Ribamar da Cruz Freitas Júnior

A Coruña, marzo de 2015



UNIVERSIDADE DA CORUÑA

Javier Cremades Ugarte, Profesor Titular de Universidad del área de Botánica del Departamento de Biología Animal, Biología Vegetal y Ecología de la Facultad de Ciencias y miembro del Grupo de investigación en Biología Costera (BioCost) de la Universidad de A Coruña,

CERTIFICO

Que la presente memoria titulada: “**Desarrollo y aplicaciones del cultivo de *Saccharina latissima* (Laminariales, Ochrophyta) en sistemas de acuicultura multitrófica integrada (AMTI)**”, presentada por D. **José Ribamar da Cruz Freitas Júnior**, ha sido realizada bajo mi dirección, cumpliendo las condiciones exigidas para su presentación y defensa, la cual autorizo.

Para que así conste a los efectos oportunos firmo la presente en A Coruña a 9 de febrero de 2015.

Fdo.: Dr. Javier Cremades Ugarte

Director de la Tesis doctoral

Agradecimientos

Ao meu orientador Dr. Javier Cremades Ugarte por sua amizade, tranquilidade, paciência e cuidado com que me orientou. Meus mais profundos agradecimentos pela oportunidade a mim concedida, de ter vindo de outro país e mesmo com todas as dificuldades ter podido estudar e realizar o mestrado e o doutorado sob sua orientação.

Muito obrigado a Sergio Pérez, Pablo Touriñán, Daniel Carcajona y a Javier Cremades por tudo que me ajudaram e ensinaram durante o doutorado. Sempre me lembrarei dos dias de coleta, biometrias intermináveis e do dia inteiro em que passamos tirando mexilhões das cordas de cultivo de macroalgas.

Ao pensar em estes seis anos e meios vividos em La Coruña, não posso me esquecer dos amigos e companheiros do mestrado e do doutorado que estiveram em cada um dos instantes vividos nessa etapa. Obrigado por terem me acompanhado e por dividirem essa experiência de vida. Em especial a Laura, Diana, Paolo, Gabriel, David, Jorge, Pilar y Jessica.

Aos meus colegas do Laboratório de Algas Marinhas da Universidade da Coruña: Ignacio Bárbara, Viviana Peña, Pilar Díaz, Pablo Touriñán, Sergio Pérez, Daniel Carcajona, Ahmed Alamrousi, Fabiola Cannatà, Marta Andrade, Verónica García, Alicia García, Juan Lugilde. Aos meus colegas de Laboratório de Ecología: Rodolfo Barreiro, Cristina Pardo, Cristina Piñero, Belén Carro, Isabel Maneiro e aos demais companheiros e professores da Faculdade de Ciências, porque sem eles, minha vivências ali não teria tantas boas recordações.

Aos meus companheiros de IFPa, em especial ao profesor João Vicente e a todos os demais professores do curso de “Pesca e Aquicultura”: Marcia Nylander, Marta Coutinho, Soniamar Saraiva, Mauricio Zorro, Carlos Rocha, Osvaldo Teixeira, Lins Erik, Welbert Sousa, Alex Lobao e Augusto Cesar. Por todo o apoio necessário durante o período do doutorado.

A María Cristina González, por ser uma pessoa que não apenas me ensinou e me enriqueceu profissionalmente como pessoalmente, como também confiou em mim para poder levar a cabo esse projeto de poder vir à Espanha e fazer o doutorado. Obrigado por ser essa pessoa acolhedora, amável e acima de tudo disposta e sempre preocupada com o que se passa comigo. Uma verdadeira mãe.

Gostaria de agradecer à minha família, que muitas vezes deixaram de lado seus próprios sonhos e interesses para que os meus se concretizassem. Ao meu pai José Ribamar, à minha mãe Irlene Bezerra e aos meus irmãos: Viviany, Rafael e Daniel, que sempre estiveram ao meu lado me apoiando a cada momento e, sem dúvida, sem seu grande apoio e companhia, apesar da distância, este sonho não teria sido o mesmo. Que mais lhes posso dizer além de que os amo muito e que sem vocês as coisas seriam muito diferentes.

Também gostaria de agradecer aos amigos de toda a vida por sua compreensão de sempre: Allan Jamesson, Paulo Garrido, Marcia Nylander, Antonio Messias, Italo Rigotti, Fortunato Castro, Virginia Martínez, Isabel González, Trini González, Antonio Couri, Thayo Viana, Angela Gregorio, Karina Martins, Damiana Oliveira, Noel Jimenes e Daniel por confiarem e acreditarem em mim e terem feito parte da etapa do doutorado um trajeto de vivência que nunca esquecerei.

A todos meus familiares, tios e primos que torceram por mim e contribuíram de um modo ou outro para tornar menos penosa a distância entre Brasil e Espanha, e me possibilitaram cursar o doutorado com mais tranquilidade. Em especial, minha tia Ivanete Rêgo a quem a considero uma segunda mãe.

Aos meus avós, que por mais que não se encontrem entre nós fisicamente, sempre estarão presente no meu coração. Em especial a Regina Estela, a minha tia avó Erundina Bezerra por haver acreditado em mim até o último momento.

A todos, Meu muito Obrigado!

Esta memoria se ha llevado a cabo gracias a la financiación de los siguientes proyectos:

- “*Acuicultura Integrada: experiencia piloto para el desarrollo de sistemas de cultivo multitróficos, 2008-2011*” financiado por el Plan Nacional de Cultivos Marinos JACUMAR.
- “*Acción Multitrofos*” acción financiada por la Consellería do Medio Rural e do Mar (Xunta de Galicia) desarrollada desde marzo de 2013 hasta diciembre de 2014.

Y tampoco podría haberse llevado a cabo sin el inestimable apoyo y colaboración de:

- La Agencia Española de Cooperación Internacional para el Desarrollo (AECID), por la concesión al doctorando de una beca predoctoral (2008-2012).
- La Planta de Cultivo de Algas del Instituto Español de Oceanografía en Santander, muy especialmente a Juan Manuel Salinas por amabilidad, buenos consejos y excelente semilla de *Saccharina latissima* sin la cual esta memoria no hubiera sido posible.
- El Centro de Investigacións Mariñas (CIMA-Corón) de la Xunta de Galicia), muy especialmente a Salvador Guerrero, el investigador principal de los “proyectos multitróficos”.
- Las empresas PORTO-MUÍÑOS S.L. y ALGAFRÉS S.L., por la utilización de sus concesiones administrativas e instalaciones en la Ría de Ares y Betanzos para el cultivos de algas.
- La empresa de cultivo de peces planos AQUACRÍA AROUSA, por abrirnos las puertas para la realización de experiencias pioneras de cultivo de *Saccharina latissima* en sistemas de AMTI en tierra.
- La empresa MARCULTURA, por dejarnos cultivar algas en sus jaulas de cultivo de peces en Esteiro (Ría de Muros).
- El Instituto Galego de Formación en Acuicultura (IGaFA), y en especial a Miguel Lastres, por su extraordinaria acogida y colaboración para la realización de los cultivos “indoor” y “outdoor” de *Saccharina latissima* dentro de la “Acción Multitrofos”.

Índice

Sección I – Aspectos generales del cultivo de macroalgas y de su aplicación en sistemas de acuicultura multitrófica integrada

Capítulo 1 - Introducción, antecedentes y objetivos	3
1-1. Introducción	3
1-1.1. El concepto de AMTI	3
1-1.2. La AMTI en el mundo	8
1-1.2.i. América	8
1-1.2.ii. Europa	9
1-1.2.ii.1 AMTI en España	9
1-1.2.iii. África y Oriente medio	10
1-1.2.iv. Asia	11
1-1.2.v. Oceanía	11
1-1.3. Papel de las macroalgas en los sistemas de AMTI	12
1-2. Antecedentes	14
1-2.1. Los cultivos de macroalgas	14
1-2.1.i. Los cultivos de laminariales	15
1-2.1.ii. Los cultivos de <i>Saccharina latissima</i>	16
1-2.1.iii. <i>Saccharina latissima</i> en sistemas de AMTI	17
1-3. Objetivos	17
1-3.1. Objetivos específicos	17

Sección II – La especie elegida

Capítulo 2 - Biología y cultivo de <i>Saccharina latissima</i>	21
2-1. Biología de <i>Saccharina latissima</i>	21
2-1.1. Descripción y ciclo biológico	21
2-1.2. Hábitat y distribución geográfica	25
2-2. Usos y aplicaciones de <i>Saccharina latissima</i>	27
2-3. Tecnología de cultivo de <i>Saccharina latissima</i>	29
2-3.1. Introducción	29
2-3.2. Producción de semilla de <i>Saccharina latissima</i>	30
2-3.2.i. Tratamiento de esporófitos maduros	30
2-3.2.ii. Obtención de esporas, germinación y comienzo del cultivo en “free-living”	31
2-3.2.iii. Inducción a la gametogénesis	32
2-3.2.iv. Siembra de los gametófitos maduros sobre los colectores y fecundación	32
2-3.2.v. Obtención de jóvenes plántulas	33
2-3.2.vi. Transporte de la semilla del laboratorio al mar	34
2-3.3. Cultivo “outdoor” e “indoor” de <i>Saccharina latissima</i>	35

Sección III – Desarrollo y optimización de las técnicas de cultivo "outdoor" de *Saccharina latissima*

Capítulo 3 - Evaluación de los sistemas de conducción.....	39
3-1. Introducción, antecedentes y objetivos.....	39
3-2. Metodología general	40
3-2.1. Ubicación de las experiencias.....	40
3-2.2. Diseño del parque de cultivo y seguimiento ambiental	42
3-2.3. Muestreos y análisis de datos.....	44
3-3. Sistemas de conducción ensayados	45
3-3.1. Primera experiencia: Siembra en vertical	45
3-3.1.i. Introducción	45
3-3.1.ii. Diseño de la experiencia	46
3-3.1.iii. Resultados y discusión.....	47
3.3.1.iii.1 Evolución de los parámetros ambientales	47
3.3.1.iii.2 Variables morfológicas, tasas de crecimiento y producción	47
3.3.1.iii.3 Evolución de la fertilidad y grado de epifitismo	48
3.3.1.iii.4 Influencia de la profundidad y localización en las cifras de producción.....	49
3-3.1.iv. Conclusiones	51
3-3.2. Segunda experiencia: Siembra en “v” transversal	51
3-3.2.i. Introducción	51
3-3.2.ii. Diseño de la experiencia	52
3-3.2.iii. Resultados y discusión.....	57
3.3.2.iii.1 Evolución de los parámetros ambientales	57
3.3.2.iii.2 Variables morfológicas y tasas de crecimiento	59
3.3.2.iii.3 Producción	64
3.3.2.iii.4 Evolución de la fertilidad y grado de epifitismo	66
3.3.2.iii.5 Influencia de las condiciones ambientales en la variables biométricas	68
3-3.2.iv. Conclusiones	70
3-3.3. Tercera experiencia: Siembra en “v” longitudinal.....	71
3-3.3.i. Introducción	71
3-3.3.ii. Diseño de la experiencia	71
3-3.3.iii. Resultados y discusión.....	73
3.3.3.iii.1 Variables morfológicas.	73
3-3.3.iv. Producción	74
3-3.3.v. Conclusiones	76
3-4. Discusión general y conclusiones finales	77
3-4.1. Producción	77
3-4.2. Sistemas de conducción	78
3-4.3. Depredación	79
Capítulo 4 - Optimización de la ventana de cultivo	81
4-1. Introducción y objetivos	81
4-2. Material y Métodos.....	86
4-3. Resultados y discusión	90
4-3.1. Evolución del peso, longitud y anchura de los ejemplares	90
4-3.1.i. Biometría inicial (16/12/2013).....	90
4-3.1.ii. Primer muestreo (13/01/2014, 28 días de inmersión).....	91
4-3.1.iii. Segundo muestreo (18/02/2014, 64 días de inmersión).....	92

4-3.1.iv. Tercer muestreo (06/03/2014, 81 días de inmersión)	93
4-3.1.v. Biometría final (Parque, 10/04/2014, 117 días de inmersión)	94
4-3.1.vi. Discusión.....	95
4-3.2. Evolución de la maduración y epifitismo	98
4-4. Conclusiones finales	99
Capítulo 5 - Integración peces–moluscos-algas	100
5-1. Introducción y objetivos	100
5-2. Metodología general de análisis elemental.....	101
5-3. Experiencias realizadas en sistemas contiguos.....	101
5-3.1. Cultivo de <i>Saccharina latissima</i> asociado a jaulas de peces en Esteiro, Ría de Muros y Noia (A Coruña)	101
5-3.1.i. Diseño de la experiencia	101
5-3.1.ii. Resultados y discusión.....	104
5-3.1.iii. Conclusiones.....	105
5-3.2. Cultivo de <i>Saccharina latissima</i> asociado a jaulas de peces y bateas de moluscos en la Ría de Arousa (Pontevedra)	106
5-3.2.i. Introducción	106
5-3.2.ii. Diseño de las experiencias	106
5-3.2.iii. Resultados y discusión.....	109
5-3.2.iii.1 Evolución de los parámetros ambientales	109
5-3.2.iii.2 Evolución de la biomasa y analítica de las algas de la primera experiencia	110
5-3.2.iii.3 Evolución de la biomasa y analítica de las algas de la segunda experiencia.....	113
5-3.2.iv. Conclusiones	115
5-4. Experiencias realizadas en sistemas en mosaico	116
5-4.1. Cultivo de <i>Saccharina latissima</i> en parques asociados a bateas de mejillón y jaulas de peces en la Ría de Ares y Betanzos.....	116
5-4.1.i. Resultados y discusión.....	116
5-5. Conclusiones finales	120
Capítulo 6 - Conclusiones generales “outdoor”	122

Sección IV – Desarrollo y optimización de las técnicas de cultivo "indoor" de *Saccharina latissima*

Capítulo 7 - Cultivos de <i>S. latissima</i> en “raceway”	127
7-1. Introducción.....	127
7-2. Material y métodos	127
7-3. Resultados.....	129
7-4. Conclusiones.....	130
Capítulo 8 - Cultivos de <i>S. latissima</i> en suspensión	131
8-1. Cultivo de <i>Saccharina latissima</i> en suspensión en tanques en paralelo con efluentes de cultivo de peces	131
8-1.1. Introducción y objetivos	131
8-1.2. Material y Métodos.....	131
8-1.3. Diseño experimental	135
8-1.4. Resultados y discusión.....	136
8-1.4.i. Evolución de la temperatura y luz incidente en los tanques.	136
8-1.4.ii. Experiencia 1: Conocer y limitar la posible fitotoxicidad de la luz natural incidente.	138

8.1.4.ii.1	Condiciones experimentales.....	138
8.1.4.ii.2	Resultados obtenidos.....	138
8.1.4.ii.3	Discusión.....	138
8-1.4.iii.	Experiencia 2: Dinámica de consumo de nutrientes (NO_3^-)	139
8.1.4.iii.1	Condiciones experimentales.....	139
8.1.4.iii.2	Resultados obtenidos.....	139
8.1.4.iii.3	Discusión.....	139
8-1.4.iv.	Experiencia 3: Influencia de la renovación de agua.	140
8.1.4.iv.1	Condiciones experimentales.....	140
8.1.4.iv.2	Resultados obtenidos.....	140
8.1.4.iv.3	Discusión.....	140
8-1.4.v.	Experiencia 4: Estudio de la densidad óptima de cultivo.	141
8.1.4.v.1	Condiciones experimentales.....	141
8.1.4.v.2	Resultados obtenidos.....	141
8.1.4.v.3	Discusión.....	142
8-1.5.	Conclusiones	143
8-2.	Cultivo de <i>Saccharina latissima</i> en suspensión en tanques en serie con efluentes de cultivo de peces	144
8-2.1.	Introducción y objetivos	144
8-2.2.	Metodología general	144
8-2.2.i.	Emplazamiento e instalaciones	144
8-2.2.ii.	Parámetros ambientales	149
8-2.2.iii.	Estudios biométricos.....	150
8-2.2.iv.	Análisis elemental.....	151
8-2.3.	Primera experiencia	151
8-2.3.i.	Diseño de la experiencia	151
8-2.3.ii.	Resultados y discusión.....	152
8.2.3.ii.1	Estudio biométrico y tasas de crecimiento	152
8.2.3.ii.2	Composición química de las algas (análisis isotópico)	155
8-2.4.	Segunda experiencia	157
8-2.4.i.	Diseño de la experiencia	157
8-2.4.ii.	Resultados y discusión.....	159
8.2.4.ii.1	Evolución de los parámetros ambientales	159
8.2.4.ii.2	Evolución de la biomasa y de los parámetros biométricos.....	162
8.2.4.ii.3	Composición química de las algas	168
8.2.4.ii.4	Química del agua	169
8-2.5.	Conclusiones	171
Capítulo 9 -	Conclusiones generales “indoor”	172

Sección V – Resumen y Conclusiones

Capítulo 10 -	Resumen y Conclusiones	175
10-1.	Resumen	175
10-2.	Conclusiones.....	176
----- 0 -----		
Referencias bibliográficas	177
Anexo	185

*Sección I - Aspectos generales del
cultivo de macroalgas y de su
aplicación en sistemas de acuicultura
multitrófica integrada (AMTI)*



Capítulo 1 - Introducción, antecedentes y objetivos

1-1. Introducción

1-1.1. El concepto de AMTI

Podemos definir acuicultura como el cultivo de organismos acuáticos en áreas continentales o costeras con fines comerciales (Crespi & Coche, 2008). En las últimas décadas existe un notable incremento mundial de la acuicultura como actividad productiva primaria, incremento que presumiblemente va a continuar en un futuro inmediato, y más aún en un país como el nuestro que para su número relativamente pequeño de habitantes está a la cabeza de Europa en la importación de productos pesqueros (FAO, 2012). Estos importantes datos llevan a hacer muy viables inversiones en el campo de la producción industrial de productos acuícolas para suplir el consumo per cápita de los mismos que, por ejemplo, en el año 2010 se estimó en 43 kg por persona (FAO 2011). Por ello esta industria en nuestro país sigue siendo una apuesta de futuro más o menos segura, aunque sólo sea para abastecer nuestro consumo interno. Pero estos buenos valores para la producción no tienen por qué implicar solo aspectos positivos. De hecho, cualquier aumento en la producción acuícola suele ir acompañado de cierto impacto ambiental que no podemos obviar, ya que las técnicas de producción intensiva siempre van acompañadas de una bajada de la calidad ambiental del entorno en donde se realiza debido a las sustancias excretadas por los organismos, sin obviar además otros posibles sobre la estética del paisaje o sobre el turismo. La capacidad de asimilación de muchos ecosistemas naturales está sobrecargada por los monocultivos de peces, moluscos y crustáceos que generan emisiones de material de desecho para el medio ambiente. Esta nitrificación puede dar lugar a diversos efectos negativos ambientales, tales como la eutrofización, el agotamiento del oxígeno, la disminución de la biodiversidad y la contaminación de las aguas circundantes.

El primer y más importante problema ambiental de la acuicultura europea es la desproporción ecológica en cuanto a los tipos de organismos cultivados. Contamos con una buena infraestructura de cultivo de peces, moluscos y otros invertebrados, pero apenas hemos desarrollado el cultivo de productores primarios; es decir, de plantas acuáticas. Nuestra producción de este tipo de organismos representa tan solo un 0,004%

de la producción mundial. Somos el continente con menor producción de estos organismos, que en un 99% recae en el continente asiático, el cual produce anualmente alrededor de 20,8 millones de plantas acuáticas. Gracias a ellos la producción global de productores primarios, en su mayoría macroalgas marinas, se estipula en un 25% del total de la acuicultura mundial, llegando al 53% del total de la acuicultura marina (FAO, 2012).

El sector de la acuicultura mundial crece a un ritmo del 6.9% por año, pero el actual debate es cómo esta actividad puede seguir creciendo de una forma sostenible y rentable. Es por ello que las actuales prácticas de monocultivo y las negativas percepciones intrínsecas a la industria acuícola están cambiando hacia una visión más positiva mediante la diversificación de la producción de especies carnívoras con organismos de menor nivel trófico en granjas acuícolas balanceadas de forma ecológica (Neori, 2007). Nace así el término “Acuicultura Multitrófica Integrada” (AMTI o IMTA: “Integrated Multi-trophic Aquaculture”) que, como su propio nombre indica, se basa en cultivar de manera integrada una serie de organismos de diferentes niveles tróficos relacionados por su medio físico de cultivo, bien sea en circuitos en serie “indoor” o en áreas próximas o anexas a cultivos “outdoor”.

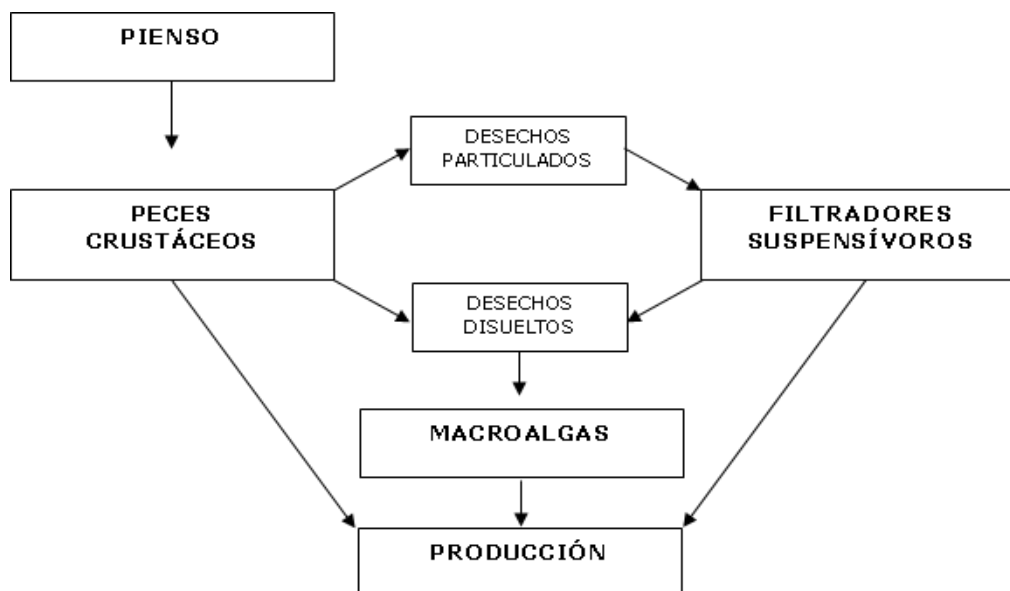


Figura 1-1. Esquema conceptual de los sistemas de AMTI.

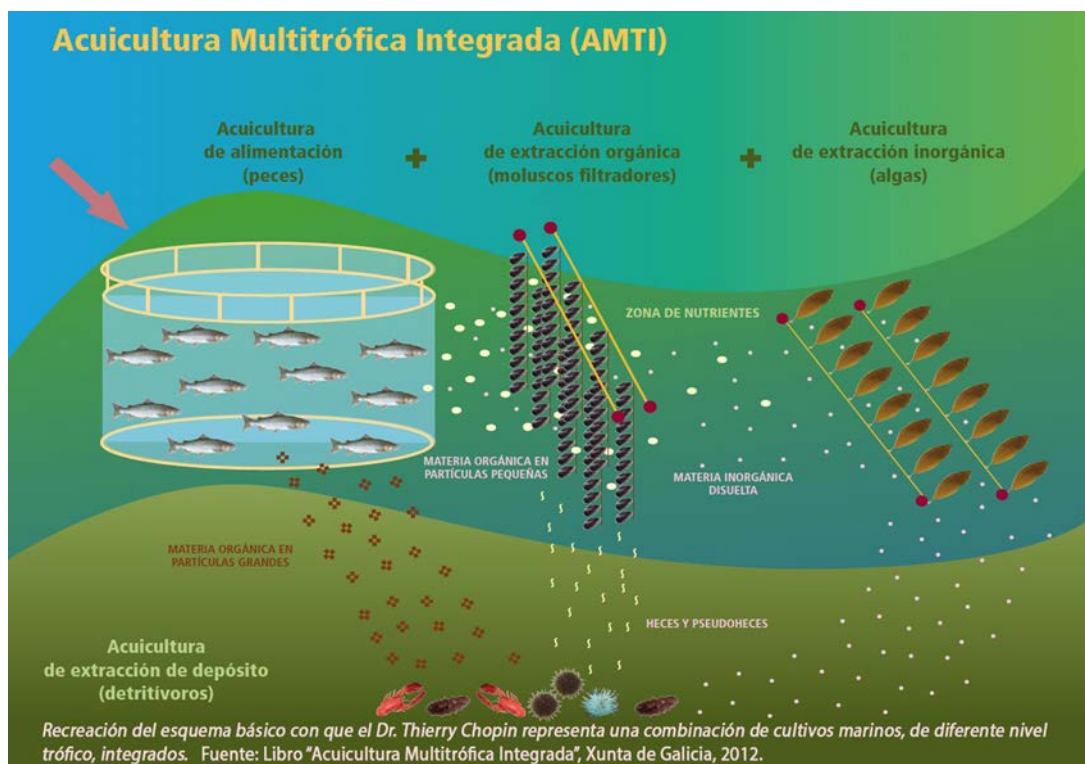


Figura 1-2. Esquema de un sistema de AMTI “outdoor” aplicable en nuestras costas.

La Acuicultura Multitrófica Integrada (AMTI) es una práctica en la cual los subproductos (desechos) de algunas especies son reciclados para que sirvan como insumos (fertilizantes, alimento) para otros (Chopin *et al.*, 2001).

En el esquema tradicional de los cultivos multitrofos (fig. 1-2), se utilizan diversos niveles en función de las capacidades y aptitudes en cuanto a la accesibilidad a esta energía considerada un desecho. Así, en una primera fase, los animales detritívoros se encargarían de aprovechar la fracción de MO (materia orgánica) particulada. La fracción correspondiente a la MO microbiana puede ser aprovechada por animales sedimentívoros y filtradores (principalmente moluscos), y la fracción de compuestos químicos generados por la propia acción microbiana y metabolismo de los peces puede ser aprovechada por las algas. Esta fracción está compuesta principalmente por macro y micronutrientes, aunque la de mayor interés corresponde a los nitratos, amonio, fosfatos y bicarbonato disueltos en el agua. La AMTI se ha propuesto como un medio para desarrollar prácticas de acuicultura respetuosas con el medio ambiente y para la gestión de recursos a través de un enfoque equilibrado del ecosistema costero (Chopin *et al.*, 2001).

Esta sucesión de cadenas tróficas va desproveyendo al agua de cultivo del exceso de energía provocado por la acuicultura intensiva, y en función de su eficacia y rendimiento,

conduciría a un proceso de depuración del agua en el sentido de la eliminación de elementos externos al sistema natural. Esta depuración, aunque no es el objetivo primordial de los cultivos multitróficos, es una consecuencia evidente de los mismos y muestra su máximo potencial cuando se acoplan a sistemas de producción de peces con recirculación de agua. En estas condiciones, los cultivos multitróficos tenderían a restituir las condiciones originales del agua mejorando las condiciones físico-químicas del medio por la simple eliminación de todo lo que se puede considerar como residuo de la acuicultura intensiva.

Los sistemas de AMTI pueden ser sistemas ubicados en tierra o en el océano, sistemas marinos o de agua dulce y pueden comprender varias combinaciones de especies (Neori *et al.*, 2004). Algunos sistemas incluyen combinaciones como moluscos/crustáceos, peces/algas/moluscos, peces/crustáceos y algas/crustáceos (Troell *et al.*, 2003.). Es importante que los organismos apropiados sean escogidos según las funciones que tienen en el ecosistema, su valor económico o potencial y su aceptación por los consumidores. Como indica uno de los padres de estas técnicas, T. Chopin (*in* Guerrero & Cremades, 2012), “AMTI es el concepto general, pero, como en la música de Bach, hay muchos temas y variaciones”. Lo que nos viene a sugerir que es un término de aplicación global pero que debe ser amoldado en cada caso a la idiosincrasia de los distintos territorios. No existe en ningún caso una fórmula maestra para la implantación de estos sistemas, sino unos conceptos generales y alguna combinación modelo de organismos y métodos de cultivo que, por su carácter precursor, se toman como pauta, como es el caso del salmón atlántico (*Salmo salar*), los mejillones (*Mytilus* spp.) y la macroalga marina “kombu de azúcar” (*Saccharina latissima*). Este es uno de los modelos utilizados por el citado autor actualmente en su país, Canadá, para la realización de este tipo de estudios. Casualmente dicho modelo en Galicia es también de aplicación. Si se seleccionan y ubican apropiadamente, las especies co-cultivadas pueden acelerar su crecimiento mediante la asimilación de los nutrientes extra proveídos por las especies que se cultivan mediante la adición de alimento. (Chopin *et al.*, 2004; Lander *et al.*, 2004). Esto incrementa la capacidad de asimilación global de un sitio y, por lo tanto, reduce el potencial de los impactos ambientales negativos, además los productos cultivados obtienen una mayor aceptabilidad social por ser obtenidos con prácticas más amigables para el medio. Un sistema de AMTI permite además diversificar la producción, sin la necesidad en muchos

casos de ocupar nuevas ubicaciones, incrementando las ganancias y reduciendo el riesgo financiero debido a las pérdidas relacionadas con los desastres climáticos, las enfermedades emergentes y las fluctuaciones del mercado (Ridler *et al.*, 2007).

En lo que a la AMTI se refiere nuestro país y en especial nuestra región ya tiene bastante camino recorrido, aunque involuntariamente, debido a la gran diversificación de cultivos promovida en especial por la producción de moluscos bivalvos. A pesar de dicha diversificación aún no estamos preparados para la integración de los distintos cultivos ya que la producción de cada uno de ellos es muy sectorial en cuanto a territorio y la mezcla de producciones suele ser un foco de conflicto entre los diversos sectores; como por ejemplo el caso de la instalación de jaulas para la producción de salmón de Louro (Ría de Muros y Noia) que generó un grave conflicto con los productores de mejillón que tuvo una gran repercusión mediática. Pero en lo que sí estamos muy atrasados en todo occidente es la producción de organismos de extracción inorgánica en el medio marino, es decir, en la producción de macroalgas, debido principalmente a su bajo valor económico, en comparación con el de otros recursos, y a la poca tradición de su empleo en la alimentación directa a diferencia de lo que ocurre en los países asiáticos. Es por ello que las experiencias de AMTI con estos organismos deben ser un foco especial de atención, ya que las algas son las únicas capaces de nutrirse de la fracción inorgánica disuelta regenerando el sistema y, por lo tanto, sus técnicas de cultivo y aprovechamiento precisan de un especial impulso tanto a nivel de investigación y desarrollo como a nivel socio-económico y administrativo.

Podemos concluir, por tanto, que las técnicas de la AMTI que integran cultivos de macroalgas son una buena apuesta de futuro en nuestra gestión de los recursos acuícolas y debemos encaminar nuestra producción acuícola en mayor o menor medida a dichos sistemas aumentando así la rentabilidad de los cultivos y reduciendo su impacto en nuestro medio ambiente, ya *per se* muy castigado.

1-1.2. La AMTI en el mundo

1-1.2.i. América

Los primeros sistemas de AMTI del continente americano surgieron a finales de 1980 en Chile. La investigación inicial incluyó el desarrollo de acuicultura integrada en tierra con trucha, ostras y algas marinas. La investigación actual en este país está concentrada en los sistemas de AMTI en aguas abiertas con salmón, algas marinas y abalón. El probable éxito de este nuevo cultivo tendrá lugar en los próximos años. El proyecto está siendo realizado por la Universidad de Los Lagos, en Puerto Montt (Buschmann *et al.*, 2007). Además, existen también experiencias recientes de cultivo de la macroalga *Gracilaria chilensis* en líneas horizontales reflatadas por boyas en sistemas AMTI que han dado cifras de producción mayor que en el cultivo de esta especie bajo las técnicas tradicionales (Abreu *et al.*, 2009).

En Estados Unidos hay estudios de co-cultivo de la macroalga *Palmaria mollis* y el abalón rojo (*Haliotis rufescens*), este co-cultivo proporciona a los agricultores un suministro fiable de alimentos nutritivos, garantizando al mismo tiempo la alta calidad de las aguas a través de la absorción de amoníaco por parte del alga, además de funcionar como alternativa a la recolección de algas silvestres (Evans & Langdon, 2000). En Molokai (Hawái), otros investigadores han desarrollado un sistema de cultivo del agarófito *Gracilaria parvispora* utilizando efluentes de los cultivos de camarón. Este estudio muestra como la acuicultura extensiva de algas puede estar vinculada a la de efluentes ricos en nutrientes producidos por los crustáceos (Nelson *et al.*, 2001).

En Canadá existe un renovado interés en la combinación de acuicultura de peces, moluscos y algas con el fin de crear un sistema de biorremediación ambiental, diversificación productiva y de mayor rentabilidad económica y aceptación social. (Chopin *et al.*, 2006). Con el apoyo de aquaNet, entre 2001 y 2006, y ahora auspiciados bajo el Fondo Atlántico de Innovación un equipo de científicos de la universidad de New Brunswick en Saint John y el Departamento de pesca Los Océanos en St. Andrews, están desarrollando un sistema piloto de AMTI a escala industrial para el co-cultivo de salmón (*Salmo salar*), algas marinas (*Saccharina latissima* y *Alaria esculenta*) y mejillón (*Mytilus edulis*) en varios lugares de la Bahía de Fundy (Chopin *et al.*, 2007).

1-1.2.ii. Europa

En Reino Unido la Asociación Escocesa para las Ciencias Marinas (SAMS) está liderando el proyecto IDREEM (“Increasing Industrial Resource Efficiency in European Mariculture”; sams.ac.uk/aquaculture) en el que se está trabajando para desarrollar diversos sistemas de AMTI en donde se co-cultivan salmón, ostras, erizos de mar y diversas macroalgas. La investigación se concentra en los procesos biológicos y físicos, así como en la economía de la producción y las implicaciones para la gestión integrada de las zonas costeras. Recientemente se están también llevando a cabo cultivos integrados de salmón atlántico en jaulas junto a “long-lines” de *Saccharina latissima*. (Sanderson *et al.*, 2012).

En Irlanda, un país con una gran tradición en el cultivo y aplicaciones de las macroalgas son muchos los proyectos que en los últimos años han desarrollado en esta línea de investigación, pero muy pocos de ellos se han centrado en aprovechar el cultivo de estos organismos para reducir el impacto ambiental o su integración en sistemas de AMTI. Solo son de señalar los cultivos experimentales de la macroalga *Chondrus crispus* integrados en la acuicultura de salmónidos y que actúan como biofiltros y como productores de materia prima de su uso en la extracción de carrageninas (Werner *et al.*, 2004).

Noruega, a pesar de poseer una tradición piscícola muy fuerte sólo en los últimos años está iniciando algo de trabajo en el aspecto de la reducción del impacto ambiental de dicha actividad. Noruega como mayor productor mundial de salmón tiene necesidad de evidenciar su interés en la ordenación sostenible del medio ambiente y la acuicultura, para lo que ha desarrollado el proyecto INTEGRATE “Atención Integrada a la acuicultura de agua de mar abierto, la tecnología para la ordenación sostenible de los cultivos en áreas de alta productividad” con investigadores de la Universidad Noruega de Ciencia y Tecnología. Este proyecto tiene el objetivo de desarrollar un nuevo concepto de acuicultura intensiva integrada de peces, moluscos y algas marinas (Handå *et al.*, 2013).

1.1.2.ii.1 AMTI en España

Los primeros antecedentes de AMTI en España fueron fundamentalmente empíricos y relacionados con el desarrollo en la década de 1940 en Andalucía de las técnicas de acuicultura en esteros como alternativa a la crisis del cultivo de langostino (*Penaeus*

kerathurus). En las últimas décadas del siglo XX y principios del XXI la mayoría de los investigadores se centraron en el uso de distintas especies de macroalgas como biofiltros en sistemas AMTI experimentales dentro de proyectos europeos como *Seapura* o *AquAgris* (Jiménez del Río *et al.*, 1994, 1996; Martínez-Aragón *et al.*, 2002; Hernández *et al.*, 2002, 2006; Gómez-Pinchetti *et al.*, 2011). Sin embargo, las primeras experiencias realmente de AMTI son fruto de las iniciativas promovidas y financiadas por la Junta Nacional Asesora de Cultivos Marinos (JACUMAR), en particular, el Plan Nacional de Cultivos Marinos financió el macroproyecto titulado “Acuicultura Integrada: experiencia piloto para el desarrollo de sistemas de cultivo multitróficos (2008-2011)”;

el proyecto (Macías *et al.*, 2008), desarrollado en seis Comunidades Autónomas (Andalucía, Galicia, Canarias, Murcia, Baleares y Cataluña) consistió en el desarrollo de diversas experiencias piloto mediante sistemas de cultivos integrados (peces /moluscos / equinodermos / cnidarios / macroalgas), tanto en instalaciones en tierra como instalaciones en mar (JACUMAR, 2011). Algunas de las experiencias de la presente memoria se encuadran precisamente en este proyecto.

En norte de Portugal el Centro de Investigaciones Marinas y Ambientales (CIIMAR, Oporto) desarrolla un experimento de AMTI en plantas de engorde en tierra de rodaballo (*Scophthalmus maximus*) y lubina (*Dicentrarchus labrax*) integrados con cultivos en tanque de las macroalgas *Chondrus crispus*, *Gracilaria vermiculophylla* y *Palmaria palmata* (Matos *et al.*, 2006).

1-1.2.iii. África y Oriente medio

Israel dispone de la empresa SeaOr Marine Enterprises Ltd., que trabaja desde hace varios años en la costa del Mediterráneo israelí, 35 km al norte de Tel Aviv en una moderna granja intensiva de maricultura integrada ubicada en tierra. La granja cultiva peces marinos (dorada), algas marinas (*Ulva* y *Gracilaria*) y el abalón japonés. Esta granja utilizó las ventajas locales como el clima, y recicló los nutrientes de las excretas de los peces en biomasa de algas marinas, las cuales a su vez fueron el alimento para el abalón. El proceso de recaptura de nutrientes en este sistema integrado es también un proceso de purificación del agua, conduciendo el agua reciclada por una parte de nuevo a los estanques de los peces y por otra al punto de efluente cumpliendo con las regulaciones ambientales. La granja recibió por ello los permisos pertinentes para el

desarrollo de su actividad y el apoyo de los organismos que se ocupan de la protección del medio ambiente en Israel (Neori *et al.*, 2004).

En Sudáfrica existen granjas que cultivan algas marinas alimentarias con los efluentes de los tanques de cultivo de abalón. Este sistema de AMTI impide la sobre-extracción de las praderas naturales de algas y permite la re-circulación del agua en el sistema evitando en gran medida el bombeo de agua de mar que contiene una alta densidad de algas tóxicas (Troell *et al.*, 2006).

1-1.2.iv. Asia

En muchos países del sudeste asiático (China, Indonesia, Vietnam, etc.) las técnicas de acuicultura integrada se llevan realizando de forma empírica en las unidades familiares que viven en el rural y también de una forma inconsciente en las amplias zonas productivas donde comparten espacio muchas pequeñas explotaciones de distintas especies. Investigadores en norte de China, con el objetivo de aprovechar los nutrientes de las granjas de peces y al mismo tiempo reducir el riesgo de eutrofización, co-cultivaron *Gracilariopsis lemaneiformis* con peces y concluyeron que este alga mejora eficazmente las características del agua. Según el estudio el cultivo de algas en las proximidades de las jaulas no sólo contrapesa los aportes de nutrientes, sino también mejora en un solo paso otros aspectos importantes, tales como oxígeno disuelto, pH y niveles de CO₂ (Zhou *et al.*, 2006). En países tecnológicamente más desarrollados se están empezando a desarrollar de una forma más científica en los últimos años. Así en Corea, el Consejo Nacional de Pesca del Instituto de Investigación y Desarrollo ya ha establecido directrices para el desarrollo industrial de policultivos. Ejemplos de los actuales sistema de policultivo incluyen abalón (*Haliotis discus hannai*), *Saccharina japonica* y *Sargassum fusiformis* (Kang *et al.*, 2008).

1-1.2.v. Oceanía

Para finalizar podemos comentar que Australia dispone de estudios de laboratorio en los cuales utiliza el tratamiento integrado de efluentes de los cultivos de camarón mediante la filtración de materia particulada por ostras y absorción de los nutrientes disueltos mediante el cultivo de la macroalga *Gracilaria edulis* (Jones *et al.*, 2001).

1-1.3. Papel de las macroalgas en los sistemas de AMTI

Como ya se ha comentado la capacidad de asimilación de muchos ecosistemas naturales está sobrecargada principalmente por los monocultivos de peces y crustáceos que generan emisiones de material de desecho para el medio ambiente derivadas de la alimentación que les es suministrada y de su propia actividad biológica. El amonio, fósforo y otros compuestos solubles de las excretas de estos organismos son nutrientes inorgánicos disponibles para las especies extractoras inorgánicas, como las algas marinas (Chopin *et al.*, 2001; Troell *et al.*, 2003; Neori *et al.*, 2004).

Esta nitrificación como ya se ha comentado puede dar lugar a diversos efectos negativos ambientales, tales como la eutrofización, el agotamiento del oxígeno, la disminución de la biodiversidad y la contaminación de las aguas circundantes. Es por ello que en los sistemas multitróficos uno de los niveles más importantes corresponde al de los seres autótrofos, responsables de la eliminación de compuestos químicos disueltos. Estos seres autótrofos pueden ser macrófitos acuáticos o algas (macro y microalgas). Tanto los macrófitos como las macroalgas, frente a las microalgas, son un grupo especialmente idóneo para esta tarea debido a que pueden ser inmovilizados y posteriormente retirados fácilmente del sistema productivo, permitiendo un proceso continuo de producción sin afectar al resto de niveles tróficos. Estudios de cultivos en tierra y mar abierto confirman que los residuos liberados de peces, crustáceos y moluscos bivalvos son especialmente aptos para el crecimiento de macroalgas por su capacidad de retener los nutrientes del agua. Un efluente en donde se han utilizado las macroalgas como biofiltro puede ser reintegrado al sistema o descargado al medio. Muchas macroalgas crecen muy bien en altas concentraciones de nutrientes, especialmente amonio (NH_4^+), por lo que su presencia evita en estos sistemas integrados las grandes concentraciones de este ión que es tóxico para la mayoría de los peces y crustáceos. La alta tasa de absorción de amonio es quizá una de las características más distintivas de los biofiltros basados en macroalgas, ya que permite reducir la velocidad de recirculación de agua en el estanque de los peces/crustáceos, al mismo tiempo que reduce las concentraciones de otros nutrientes excretados por los mismos evitando así su vertido a las aguas costeras.

La selección de especies de macroalgas para su uso comercial como biofiltros depende principalmente de dos aspectos: en primer lugar del interés de los inversores sobre el valor comercial de una nueva especie que se incorpora al sistema y, en segundo lugar, de su

capacidad fisiológica para el crecimiento en distintas condiciones de cultivo y para eliminar los nutrientes disueltos (Buschmann *et al.*, 2001). Así, desde el punto de vista biológico las características idóneas que una especie de macroalga debería tener para su inclusión en un sistema AMTI son: alta tasa de crecimiento y riqueza en nitrógeno, facilidad de cultivo y control de su ciclo de vida, resistencia a los epífitos y patógenos y plasticidad ecofisiológica. Además deben ser especies autóctonas, habida cuenta de los daños ecológicos que puedan resultar de la introducción de organismos alóctonos. Más allá de estos criterios biológicos básicos, la elección de especies de algas marinas a cultivar se verá influida por su valor comercial y capacidad de biorremediación. Si se hace hincapié en el valor de la biomasa producida, entonces las decisiones posteriores se basarán en la calidad de los tejidos y el valor añadido de compuestos secundarios. Si el enfoque principal es el proceso de biorremediación, la absorción y almacenamiento de nutrientes, junto a una alta tasa de crecimiento, son los factores determinantes. La elección de especie entonces está sujeta a un adecuado balance entre ambas características (Neori *et al.*, 2004).

Las especies de macroalgas más adecuadas para los sistemas de acuicultura integrada pueden variar mucho en función del tipo de cultivo; siendo los siguientes géneros los de mayor interés y potencialidad para el desarrollo de los mismos: las algas pardas *Alaria*, *Durvillaea*, *Ecklonia*, *Laminaria*, *Lessonia*, *Macrocystis*, *Saccharina* y *Saccorhiza*; las rojas: *Asparagopsis*, *Callophyllis*, *Chondracanthus*, *Chondrus*, *Gigartina*, *Gracilaria*, *Sarcothalia*, *Palmaria* y *Porphyra*; y las verdes del género *Ulva* (Chopin *et al.*, 2008).

Ya en la década de 1970 empezaron a aparecer los estudios sobre los sistemas de AMTI con incorporación de macroalgas marinas, al principio a escala de laboratorio y con lenta expansión a escala piloto (Neori *et al.*, 2004). El creciente interés en el desarrollo de los cultivos de macroalgas marinas es un reflejo del desarrollo y diversificación general de la acuicultura de enfoque ecosistémico y de los avances en la investigación fundamental llevada a cabo por las universidades, así como por la industria dedicada a buscar nuevas aplicaciones y productos (Werner *et al.*, 2004). Ya nadie duda que la inclusión de algas en los sistemas integrados es una de las maneras más prometedoras de desarrollo de la maricultura sostenible (Naylor *et al.*, 2000).

1-2. Antecedentes

1-2.1. Los cultivos de macroalgas

Durante siglos se han cultivado algas, en el Oriente se emplean desde el siglo IV primeramente como uso para alimentación humana, actualmente son utilizadas para la obtención de ficocoloides y también en la industria farmacológica y cosmética, como combustibles, en tratamiento de aguas residuales, etc. En nuestros días las algas son una fuente muy importante de recursos, según la FAO el valor total anual de la producción de la industria de las algas se estima entre 5500 y 6000 millones de dólares USA. De ese total, a los productos alimenticios para consumo humano pertenece un valor de 5.000 millones de dólares. Las sustancias que se extraen de las algas, los ficocoloides de uso industrial, constituyen una gran parte de los restantes miles de millones de dólares, mientras que el resto corresponde a diversos usos menores, como fertilizantes y aditivos para piensos (FAO, 2012). El rápido desarrollo en el cultivo de algas está relacionado con muchas características biológicas deseables presentes en estos organismos, tales como ser autótrofas, de fácil manejo, tener una alta tasa de crecimiento y capacidad de regeneración (Buschmann *et al.*, 1995).

El mundo de la explotación industrial de las macroalgas bentónicas marinas cada día cobra más importancia, principalmente debido al incremento de su uso en el campo de la alimentación, industria farmacéutica y talasoterapia. Año tras año, en el ámbito mundial, la industria necesita una cantidad creciente de estas materias primas. Las macroalgas utilizadas por la industria en un principio eran aportadas por las poblaciones naturales, pero actualmente éstas son totalmente insuficientes para satisfacer su demanda. Respondiendo a esta necesidad, a mediados del siglo XX surgieron los primeros intentos de ficocultura, técnica que hoy en día produce aproximadamente el 70% de las algas utilizadas en el mundo (Cremades *et al.*, 1998). Sin embargo, en Europa, la mayor parte de las macroalgas procesadas por la industria aún siguen siendo las de las poblaciones naturales.

Dentro de las algas con interés comercial las laminariales ocupan un papel destacado, siendo empleadas en 1985 en la Comunidad Europea, según datos de la FAO, 229.173 toneladas de algas pardas frescas, el 9% de la producción mundial, de las cuales el principal aporte de especies proviene de las laminariales. Esta demanda viene

principalmente vinculada a la actividad de la industria de los ficocoloides, que obtiene de estas materias primas diversos derivados del ácido algínico (Guiry & Blunden, 1992).

Dentro de las especies europeas de *Laminaria*, las de mayor importancia por su volumen de recolección como materia prima para la industria son *Laminaria digitata* (Linnaeus) Lamouroux y *Laminaria hyperborea* (Gunnerus) Foslie. *Saccharina latissima* (Linnaeus) Lane, Mayes, Druehl & Saunders, la especie utilizada en los experimentos de esta tesis, no es muy empleada en la industria de los ficocoloides, pero, por el contrario, tiene muy buenas perspectivas de explotación y comercialización en el campo de la alimentación y talasoterapia, ya que de las especies atlánticas del género *Laminaria* es la que tiene mayor tasa de crecimiento (Lüning, 1979).

La explotación industrial de los bancos naturales de *Saccharina latissima* en aguas gallegas no es rentable desde el punto de vista económico, ni ambientalmente deseable, ya que se trata de una especie cuyo límite meridional de su área de distribución se encuentra en nuestras aguas (Izquierdo *et al.*, 1993), por lo que forma poblaciones poco extensas, muy dispersas por el territorio y de alto valor ecológico y biogeográfico.

Debido al reciente interés suscitado en torno a la explotación de esta especie por la industria local y a la ausencia de experiencias anteriores de cultivo en tierra (cultivos “indoor”) y en mar (cultivos “outdoor”), surge la necesidad de plantear un estudio de la viabilidad de su cultivo con el fin de obtener una producción de biomasa suficiente y constante, que pueda ser empleada por la industria en el diseño y comercialización de productos derivados de ella.

1-2.1.i. Los cultivos de laminariales

La especie de *Laminaria* más cultivada en el mundo es *Saccharina japonica* (Areschoug) Lane, Mayes, Druehl & Saunders, llamada “kombu asiático”, de gran parecido con *Saccharina latissima*. Este alga tiene una gran tradición culinaria en los países orientales y es la primera en producción mundial, con 5.250.000 toneladas en el año 2010, seguida por el “nori” (*Pyropia* y *Porphyra* spp.) y “wakame” [*Undaria pinnatifida* (Harvey) Suringar] en segundo y tercer lugar, respectivamente (FAO, 2012).

1-2.1.ii. Los cultivos de *Saccharina latissima*

Los primeros antecedentes del cultivo de *Saccharina latissima* son pequeños experimentos orientados a estudios fisiológicos realizados bajo condiciones controladas en tanques de cultivo, o bien situados en el mar (Markham, 1979; Gerard *et al.*, 1987, 1997; Dring *et al.*, 1996).

El primer experimento de cultivo de *Saccharina latissima* orientado a obtener exclusivamente una gran producción de biomasa con fines industriales fue el efectuado en las costas atlánticas de Estados Unidos dentro del programa “New York marine Biomass Program” (Brinkhuis *et al.*, 1983), experimento que, aunque no continuó, demostró la viabilidad de este cultivo. A estos cultivos le siguieron los llevados a cabo en la Columbia Británica, Canada (Druehl *et al.*, 1988), la Isla de Man, Reino Unido (Kain *et al.*, 1990) y Helgoland, Alemania (Buck & Buchholz, 2004). En España, particularmente en Galicia se han llevado a cabo experiencias de cultivo en “long-line” horizontal de esta especie para el estudio de productividad en cosechas anuales y bianuales a partir de “semilla” (jóvenes esporófitos) obtenida en laboratorio por el método del “free-living” desarrollado por el IFREMER (Pérez *et al.*, 1992) para el cultivo de *Undaria pinnatifida* y adaptado por los técnicos de la Planta de Cultivos de Algas del I.E.O. en Santander para esta especie (Salinas Morrondo, 2011). La producción de estas primeras experiencias fue de 6 kg/m de cuerda de cultivo en peso húmedo para la cosecha anual y de 4 kg/m en peso húmedo para la cosecha bianual; esta diferencia se debió a la mortalidad sufrida por los esporófitos de la cosecha bianual durante el verano por las elevadas temperaturas (Peteiro *et al.*, 2006).

Más adelante Cremades *et al.* (2007) indican un nuevo método para el cultivo en cuerda vertical de esta especie que llega a duplicar la producción obtenida hasta el momento al obtener una producción media cercana a los 13 kg/m. En otra experiencia, también llevada a cabo en las costas gallegas, se estudiaron las diferencias de producción de este cultivo en función de la fecha de siembra en el mar, sacándose como conclusión, como era de esperar, que cuanto antes se siembre mejor será la cosecha; siempre y cuando la época de inicio sea ya adecuada para este cultivo (Peteiro *et al.*, 2009).

1-2.1.iii. *Saccharina latissima* en sistemas de AMTI

Las primeras experiencias encaminadas a la integración de los cultivos de *Saccharina latissima* como extractores inorgánicos junto a cultivos de peces y/o molucos en sistemas de AMTI fueron llevados a cabo en Canadá en ambos océanos: en el Pacífico norte en la Columbia Británica (Subandar *et al.*, 1993; Petrell & Alie, 1996; Ahn *et al.*, 1998), y en el Atlántico norte en la Bahía de Fundy (Chopin *et al.*, 2004; Barrington *et al.*, 2009).

En Europa experiencias de AMTI en mar abierto con esta especie han sido llevadas a cabo recientemente en Escocia (Sanderson *et al.*, 2012) y Noruega (Handå *et al.*, 2013), en ambos casos combinando estos cultivos con los de samón (*Salmo salar*) en jaulas. En el Noroeste de España, las primeras experiencias de cultivo de *Saccharina latissima* asociado a bateas de mejillón fueron llevada a cabo en la Ría de Ares y Betanzos (A Coruña, Galicia). Sin embargo, estas primeras experiencias (Peteiro *et al.*, 2006; Cremades *et al.*, 2007; Peteiro & Freire, 2009), como vimos, estaban centradas únicamente en la producción de macroalgas sin tener en consideración los potenciales beneficios de la integración de estos cultivos con los de los moluscos circundantes.

1-3. Objetivos

La directriz general que justifica la realización de esta tesis es dar los primeros pasos en el desarrollo de las técnicas de ficocultura de *Saccharina latissima* (“kombu de azúcar”) en la costa gallega, siguiendo modelos ya establecidos para el cultivo de especies análogas en otras partes del mundo, con el propósito de su integración en diversos sistemas de AMTI con el objeto de colaborar en la transferencia al sector industrial de la tecnología necesaria para su cultivo en estos sistemas y contribuir así al desarrollo del nuevo sector de la agronomía marina y a la futura y necesaria diversificación de la maricultura gallega.

1-3.1. Objetivos específicos

Esa memoria se divide en dos partes: Cultivo de *Saccharina latissima* en sistemas “outdoor” (cultivo en mar abierto) y en sistemas “indoor” (cultivo en sistemas en tierra), y profundiza tanto en la propia optimización de los mismos en ambos medios como en su

integración con otros cultivos con el objeto de su futura aplicación en sistemas de acuicultura multitrófica integrada (AMTI).

Los objetivos específicos de los cultivos “outdoor” de *Saccharina latissima* para su empelo en distintas experiencias en sistemas multitróficos (AMTI) son:

- Evaluar distintos sistemas de conducción y manejo del cultivo para optimizar las cifras de producción y contribuir al conocimiento de la influencia de las condiciones ambientales sobre la misma.
- Desarrollar estrategias para optimizar la productividad en la ventana de cultivo para esta especie en aguas gallegas.
- Estudiar el grado de integración de este cultivo con los de otras especies y las estrategias espaciales de asociación de estos cultivos.

Por otra parte, los objetivos específicos del cultivo “indoor” de *Saccharina latissima* para su empelo en distintas experiencias en sistemas multitróficos (AMTI) son:

- Conocer el comportamiento de los factores ambientales limitantes vinculados a la producción en un modelo de cultivo intensivo de esta especie en suspensión, utilizando para ello efluentes de sistemas de producción de peces planos que trabajan en recirculación de agua.
- Conocer la densidad máxima de cultivo en suspensión y la óptima desde el punto de vista productivo así como la influencia de la talla de las plantas sobre su tasa de crecimiento.
- Conocer la capacidad de biofiltración de NH_4^+ NO_2^- NO_3^- y PO_4^- de esta especie y la influencia que la concentración de nutrientes tiene sobre su calidad comercial y la resistencia al estrés.

Sección II – La especie elegida



Capítulo 2 - Biología y cultivo de *Saccharina latissima*

2-1. Biología de *Saccharina latissima*

2-1.1. Descripción y ciclo biológico

Saccharina latissima (Linnaeus) Lane, Mayes, Druehl & Saunders

≡ *Fucus saccharinus* Linnaeus, 1753

= *Laminaria saccharina* (Linnaeus) Lamouroux

División Ochrophyta, Orden laminariales, Familia Laminariaceae

El esporófito de *Saccharina latissima* (fig. 2-1) está formado por tres partes bien diferenciadas: una base rizoidal, un estipe o cauloide erecto y una gran lámina o filoide que crece indefinidamente a expensas de un tejido meristemático localizado en la zona estipofrondal. El estipe, que normalmente no sobrepasa los 15 cm de longitud, es compacto, cilíndrico y muy flexible, fijándose al sustrato mediante un sistema rizoidal profusamente ramificado. En su extremo superior el estipe se ensancha para dar una larga lámina entera lineal-lanceolada (normalmente de hasta 3-4 m de largo por 30 cm de ancho), de superficie corrugada y margen ondulado y rizado. La morfología de esta especie de todas formas se ve muy modificada por las condiciones ambientales, así por ejemplo en experiencias de cultivo en mar abierto las láminas de esta especie llegan a ser casi en forma de látigo (Buck & Buchhlox, 2004).

La consistencia de la lámina es firme pero membranosa, de color pardo-amarillento y, a diferencia de las especies europeas de *Laminaria* de filoide digitado, presenta un ancho engrosamiento longitudinal en su centro. La fronde crece indefinidamente en longitud de forma basípeta, aunque a distinta velocidad según la época del año, de manera que de enero a julio la tasa de crecimiento en longitud de la fronde es mayor que en el intervalo comprendido entre julio y diciembre. En las Islas Británicas, el período de crecimiento más rápido es enero-marzo y el más lento se registra en octubre-noviembre (Parke, 1948). En la Península Ibérica sigue un patrón algo diferente, siendo el período más desfavorable los meses de final de verano, agosto-septiembre, sin duda por la mayor temperatura e insolación de nuestras aguas.

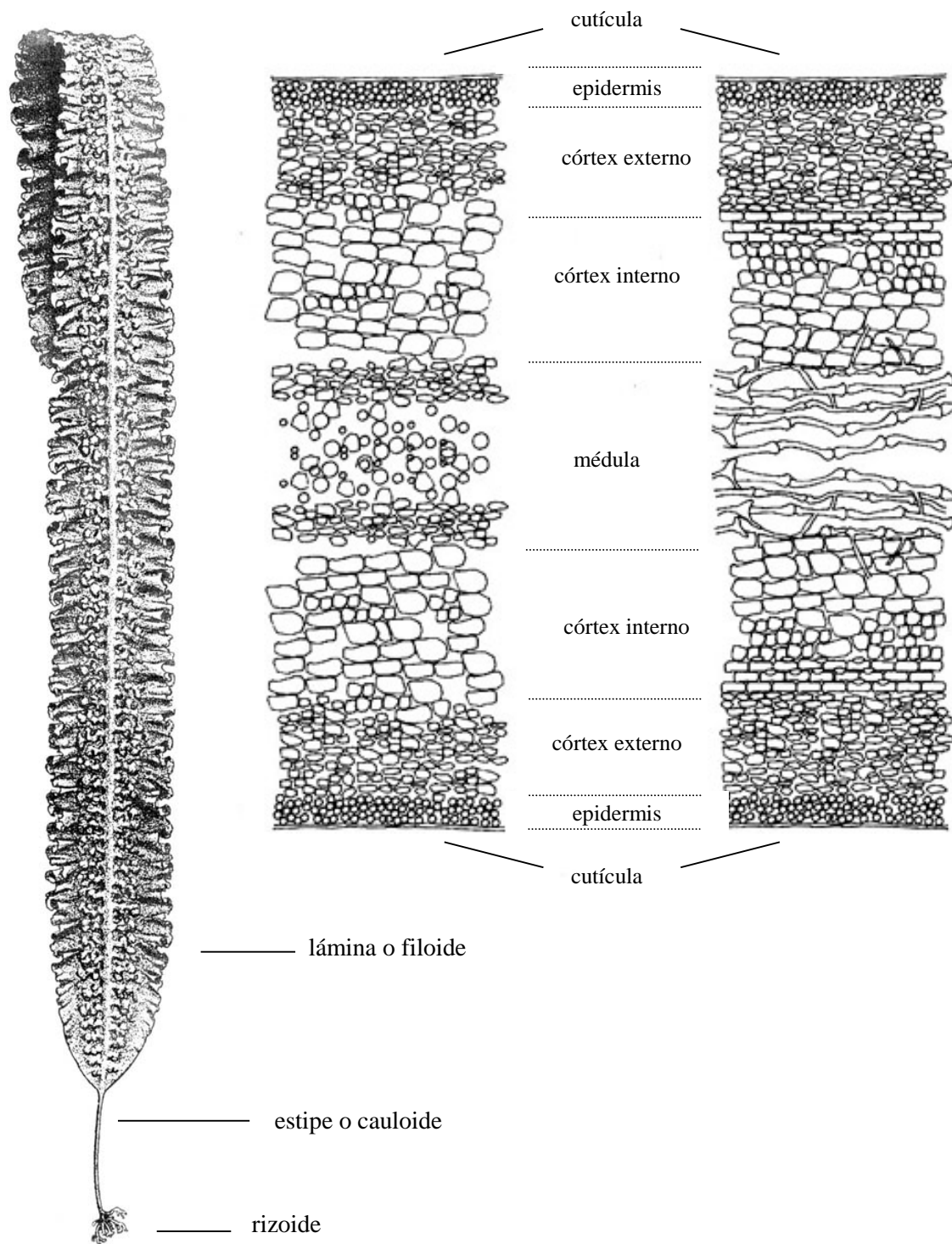


Figura 2-1. Esporófito adulto de *Saccharina latissima* donde se observan sus tres zonas diferenciadas: lámmina o filoide, estipe o cauloide y rizoide. A la derecha secciones transversal y longitudinal de la lámmina donde se observa la disposición de los distintos tejidos: cutícula y epidermis, córtex externo e interno y médula con las características "células en trompeta" observables en la sección longitudinal (tomado de Sauvageau, 1918 y Perez *et al.*, 1992).

Un corte transversal de la lámina (fig. 2-1) muestra su diferenciación en tres zonas: de dentro a fuera encontramos la epidermis, el córtex y la médula. La epidermis comprende una cutícula mucilaginosa seguida por una meristodermis compuesta por pequeñas células dispuestas en empalizada, fuertemente coloreadas por cromatóforos elipsoides y capaces de dividirse en varias direcciones. El córtex está formado por células alargadas e hialinas; éste se divide en córtex externo, con células hexagonales, y córtex interno con células más grandes y rectangulares. La zona intercelular y la lámina media son muy ricas en mucílagos, principalmente fucoídina y alginato cálcico. La médula está compuesta en su periferia por numerosas células filamentosas que se entrecruzan, llamadas “células en trompeta”, encargadas del flujo de sustancias elaboradas y que en su centro están dispuestas de modo regular (Perez *et al.*, 1992).

Desde el punto de vista citológico, la pared de las células consta de una fracción sólida y otra mucilaginosa. La primera se compone de fibrillas de celulosa y de alginato, la segunda de alginato y fucoídina. Los alginatos son sales de ácido algínico (polímero de ácido β -D-manurónico y ácido β -L-glucurónico) con distintos cationes (como Ca^{++} , Mg^{++} , Na^+ y K^+). En el plasto se pueden encontrar clorofilas a y c, además de pigmentos pardos como la fucoxantina (una xantofila que enmascara el resto de los pigmentos) y diversos carotenoides. Como sustancia de reserva acumula un polisacárido denominado laminarina (Perez *et al.*, 1992).

El ciclo de vida de este alga, propio de todas las laminariales, es digenético haplo-diplofásico y con alternancia marcadamente heteromórfica de generaciones. La generación productiva es el esporófito, mientras que la gametofítica es simplemente una fase generativa. En la fig. 2-2 se representa el ciclo de vida de la análoga *S. japónica*.

Las grandes láminas del esporófito producen en otoño soros de esporocistes a lo largo de la parte central de su lámina a partir de las células de la epidermis. Los esporocistes son piriformes y se encuentran acompañados de paráfisis, liberan meiosporas (n) heterocontas de 5 a 8 μm de diámetro, y que tienen un cromatóforo pálido en su mitad posterior. Tras una breve vida planctónica se fijan a un sustrato, pierden los flagelos y germinan dando lugar a gametófitos haploides paucicelulares microscópicos. Estos gametófitos son dioicos y presentan un cierto dimorfismo sexual. Los masculinos son más ramificados y de células más pequeñas, mientras que los femeninos son más sencillos

y de células mucho más voluminosas. Estos gametófitos se desarrollan vegetativamente en invierno y, cuando notan el aumento de la luz y temperatura que anuncia la primavera, entran en gametogénesis produciendo los gametófitos masculinos pequeños espermatozoides flagelados y los femeninos grandes ovocélulas inmóviles que tras la oogamia darán lugar a cigotos ($2n$) que por mitosis originarán nuevos esporófitos que se desarrollan sobre el propio gametófito femenino (Perez *et al.*, 1992).

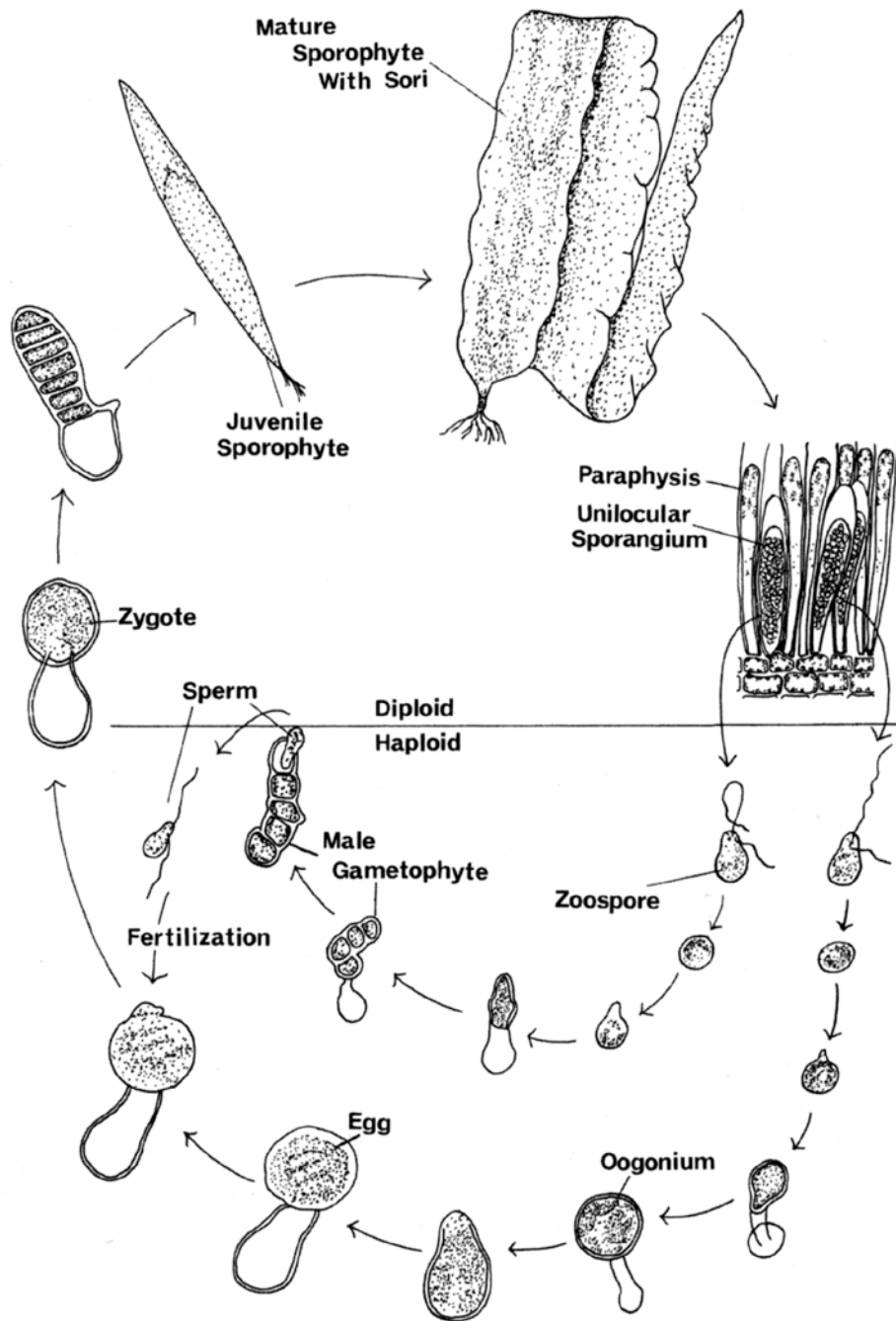


Figura 2-2. Ciclo de vida de *Saccharina japonica* (Tomado de Cheng, 1969).

2-1.2. Hábitat y distribución geográfica

Saccharina latissima, en aguas gallegas, vive principalmente en el infralitoral, junto con *Cystoseira baccata* (Gmelin) Silva o especies de *Laminaria*, en ambientes protegidos del oleaje en los que se acumula arena, pudiendo llegar hasta el nivel inferior del litoral (fig. 2-3). Es frecuente en zonas portuarias de aguas limpias, por el especial grado de protección de las mismas. Es una especie reófila y, de hecho, su morfología acintada de superficie corrugada es una adaptación a ello. La temperatura óptima del agua para el crecimiento de *S. latissima* es variable, debido a la existencia de diferentes ecótipos y variedades (Sauvageau, 1918; Egan *et al.*, 1989; Gerard, 1990), ya que probablemente es una especie que en nuestros días se encuentra en un activo proceso de especiación, si bien algunos autores indican que en las costas atlánticas para la viabilidad de los gametófitos la temperatura del agua en invierno no debe sobrepasar los 13° C (Li de 20° C para los esporófitos (Lüning, 1990). De todas formas, se sabe que los esporófitos de determinados ecótipos toleran períodos estivales con temperaturas superiores a los 20° C (Bruhn & Gerard, 1996), mientras que otros son capaces de sobrevivir en las aguas extremadamente frías de la región circumpolar. Estudios recientes de transcriptómica llevados a cabo en *S. latissima* reflejan la capacidad que para mitigar los daños de la aceleración de metabolismo que produce el efecto sinérgico entre luz y temperatura reduciendo o aumentando ciertas rutas metabólicas encaminadas al aprovechamiento de los nutrientes existentes en el medio (Heinrich *et al.*, 2012).

En cuanto a su distribución geográfica, *Saccharina latissima* es una especie anfiocéánica que se distribuye por el Atlántico y Pacífico. En el NE Atlántico está presente desde Groenlandia hasta el norte de Portugal. En el Pacífico está presente desde Alaska hasta California (Guiry & Nic Dhonncha, 2009). Lüning (1990) señala también su presencia en China y Corea.

En la Península Ibérica, su presencia está restringida a las costas del cuadrante noroccidental, desde las costas asturianas hasta el norte de Portugal (Izquierdo *et al.*, 1993). Esto es debido, en gran parte, a que esta especie se encuentra en el límite meridional de su área de distribución, ya que, como vimos, para la supervivencia de los esporófitos, la temperatura máxima del mar no debe superar en ningún caso los 20° C

(Lüning, 1990); límite que suele sobrepasarse en el resto de nuestras costas. Por esta causa, dentro de la rareza de esta especie en el contexto peninsular, es en Galicia donde las condiciones para su desarrollo son más adecuadas y se pueden encontrar, aunque dispersas, sus mejores poblaciones.



Figura 2-3. Esporófitos de *Saccharina latissima* en el medio natural en las costas gallegas.

2-2. Usos y aplicaciones de *Saccharina latissima*

En los países del norte de Europa *Saccharina latissima* ha sido utilizada desde antiguo como alimento animal y humano o para el abonado de los campos de cultivo (Flaherty, 1934; Newton, 1951). Para su uso como alimento del ganado, en diversos países de las costas atlánticas europeas se acostumbraba dejar pastar al ganado, sobre todo bovino, en el cinturón litoral durante las bajamares vivas, momento en que aprovechaban para ramonear principalmente *S. latissima*, junto a otras algas, como *Mastocarpus stellatus* (Stackhouse) Guiry, *Chondrus crispus* Stackhouse, *Ascophyllum nodosum* (Linnaeus) Le Jolis y *Palmaria palmata* (Linnaeus) Kuntze (Newton, 1951; Hallson, 1961). Ya más recientemente, a principios del siglo XX, se incorporaban harinas de *S. latissima* y de otras Laminariales y Fucales en determinados piensos animales, práctica que tuvo su apogeo a mediados del siglo, coincidiendo con la escasez de recursos originada por la Segunda Guerra Mundial. Desde mediados del siglo XIX fue utilizada también en algunos países europeos, junto con otras especies, como materia prima industrial para la extracción de sodio, potasio y yodo (Newton, 1951); si bien este empleo cayó en desuso con la aparición de nuevas materias primas o procesos industriales más rentables.

Aunque actualmente esta especie, como la mayoría de las Laminariales, puede ser materia prima para la obtención de alginatos, tiene más valor como especie de uso en la alimentación animal y humana, en la medicina natural, talasoterapia y la fabricación de diversos alimentos funcionales o biotransformados, debido a la presencia en ella de diversos componentes con buenas propiedades nutricionales o principios activos de aplicaciones terapéuticas (Guiry & Blunden 1992).

Saccharina latissima cobra cada vez mayor interés en la alimentación humana en los países occidentales. Actualmente forma parte de las algas vendidas en Europa bajo el nombre de “kombu de azúcar” y se caracteriza por tener un alto contenido proteico y bajo contenido calórico (49 kcal/100 g deshidratados); por otra parte, la cantidad de lípidos es reducida y una gran parte sus carbohidratos son polisacáridos no digeribles por los enzimas humanos. Es además muy rica en sales minerales como el yodo, sodio, potasio, sílice y calcio, además de ser una buena fuente de vitaminas A, B, C, D y E, sobre todo las del grupo B (Jiménez-Escrig & Goñi Cambrodón, 1999).

En cuanto a sus cualidades terapéuticas, en medicina y farmacia se emplean algunos de sus derivados para combatir el hipotiroidismo y ayudar a la regulación de la tensión arterial (Funayama & Hikino, 1981). Por ser rica en ácidos grasos poliinsaturados tiene además propiedades hipolipemiantes e hipoglicémicas (Lamela *et al.*, 1989), a la vez que es un potente antioxidante que neutraliza los radicales libres (Yan *et al.*, 1999). En el campo de la investigación contra el cáncer, las especies de *Saccharina* y *Laminaria* tienen un papel relevante por sus propiedades antimutagénicas (Okai *et al.*, 1993; Yamamoto *et al.*, 1987). En medicina natural, homeopatía y talasoterapia se usa por sus propiedades estimulantes de las glándulas endocrinas (la glándula tiroides especialmente), remineralizantes y reconstituyentes, estimulantes de la circulación sanguínea (por vasodilatación periférica), laxantes (por acción mecánica y debido a la presencia de manitol), adelgazantes e hipocolesterolemiantes (Donadieu *et al.* 1985).

Por tanto, dentro de las macroalgas bentónicas marinas, *Saccharina latissima* tiene un papel destacado en la alimentación por sus cualidades nutricionales. Sin embargo, al igual que el resto de las algas, y por extensión de otros talófitos, tiene un gran potencial en la bioacumulación de metales en sus tejidos. Los procesos implicados en esta acumulación son tanto activos como pasivos, produciéndose por intercambio de iones unidos a la superficie de polisacáridos o por el secuestro de éstos dentro de sus vacuolas ricas en polifenoles (Phillips, 1990). Es por ello que su recolección o cultivo debe realizarse en zonas con una gran tasa de renovación de agua o de poca contaminación.

Por otra parte, la explotación industrial de los bancos naturales de esta especie en aguas gallegas no es rentable desde el punto de vista económico, ni ambientalmente deseable, ya que se trata de una especie que como ya se indicó tiene el límite meridional de su área de distribución en el noroeste peninsular, por lo que forma poblaciones en general poco extensas, muy dispersas por el territorio y de alto valor ecológico y biogeográfico.

Todas estas características hacen de *Saccharina latissima* el alga parda europea más prometedora como integrante de sistemas de AMTI, por su fácil cultivo, alta tasa de crecimiento y valor añadido. Es, además, un excelente sustituto local para el “kombu” asiático (*S. japonica*), siendo su biomasa útil tanto para la alimentación y bienestar del hombre como para diversos usos agropecuarios, extracción de alginatos, producción de biogás y otras muchas aplicaciones (Guiry & Blunden, 1992; Bixler & Porse, 2012).

2-3. Tecnología de cultivo de *Saccharina latissima*

2-3.1. Introducción

La sucesión y desarrollo de las distintas fases vitales de *Saccharina latissima* está condicionada básicamente por factores físicos del medio (temperatura, luz y fotoperíodo). En el medio natural, la evolución de estos factores a lo largo del año rige la aparición, desarrollo y término de dichas fases; aunque éstas, en cierta medida, pueden solaparse en el tiempo.

En el caso de *Saccharina latissima*, el gametófito tiene una temperatura óptima de crecimiento y maduración en torno a los 12-13° C, y para que se produzca la gametogénesis, se requieren dosis lumínicas relativamente altas. Esta es, en cierto modo, la evolución de las condiciones ambientales en el medio natural durante la primavera. Después, los embriones y pequeñas plántulas originadas, muestran una amplia adaptación a condiciones menos restrictivas de luz y temperatura (Indegaard *et al.*, 1990) y, bajo una ley de mínimos, ajustan su crecimiento a las condiciones ambientales (Hanelt *et al.*, 1997; Gerard, 1997a). Asumiendo, por tanto, que los puntos restrictivos en las fases digenéticas se establecen principalmente en los momentos de la maduración de los gametocistes o esporocistes, y que el crecimiento vegetativo en ambas generaciones manifiesta una mayor capacidad de adaptación a un margen amplio de condiciones, es posible aumentar los períodos de cultivo en el medio natural, siempre y cuando sea posible obtener la semilla.

Las técnicas de producción de gametófitos y plántulas en laboratorio permiten modificar a voluntad los calendarios de producción de las fases vitales mediante técnicas de simulación ambiental. Ello permite obtener plántulas de Laminariales en períodos totalmente diferentes a los del medio natural. Por otro lado, la utilización de siembras en colectores de alta densidad permite obtener gran cantidad de semilla con una reducida infraestructura.

El estudio de la viabilidad del cultivo de *Saccharina latissima* requiere reproducir todas las fases de su ciclo vital digenético, siguiendo un cronograma que permita el desarrollo de esporófitos adultos (la materia prima industrial) en condiciones naturales.

Las fases más importantes de este proceso son:

- Obtención y mantenimiento de los gametófitos en “free-living”.
- Siembra de colectores con gametófitos maduros.
- Fecundación y formación de cigotos.
- Crecimiento y diferenciación de los jóvenes esporófitos (plántulas).
- Implante en el mar para su desarrollo definitivo.

El ciclo vital digenético propio de Laminariales obliga a dividir la técnica de cultivo en dos fases muy bien diferenciadas. La primera de ellas, hasta la obtención de las jóvenes plántulas (la denominada “semilla”) debe realizarse en laboratorio; mientras que la segunda, el desarrollo de estas plántulas hasta la talla comercial, debe realizarse en el mar.

2-3.2. Producción de semilla de *Saccharina latissima*

Esta fase fue desarrollada por el personal de la Planta de Cultivos de Algas del Instituto Español de Oceanografía (I.E.O.) en Santander, dirigida por el investigador Juan Manuel Salinas Morondo, responsable de dicha planta y de los proyectos de cultivo de algas para la alimentación humana. Para la producción de gametófitos en laboratorio y obtención de pequeñas plántulas de esporófitos se siguió, básicamente, el método europeo desarrollado por el IFREMER francés (Perez *et al.*, 1992). Este método permite obtener plántulas en cualquier época del año mediante simulación ambiental en el laboratorio y se organiza en las siguientes tareas.

2-3.2.i. Tratamiento de esporófitos maduros

Las partes fértiles de esporófitos (en este caso obtenidas de poblaciones naturales de *Saccharina latissima* procedentes de aguas gallegas, concretamente del Puerto de Dexo, en la Ría de Ares y Betanzos, A Coruña) se fraccionan, limpian de epífitos y esterilizan con hipoclorito sódico. Posteriormente, las porciones fértiles seleccionadas se someten a una deshidratación superficial, en frío y oscuridad, durante 24-48h para fomentar la emisión de zoosporas (fig. 2-4).

2-3.2.ii. Obtención de esporas, germinación y comienzo del cultivo en “free-living”

El extracto definitivo de zoósporas se obtiene por rehidratación y agitado de las partes fértiles en agua de mar fría y estéril y un filtrado final a 10-20 μ m (fig. 2-4). Por término medio, en función de la densidad, 40 ml de extracto de zoósporas se añaden a 2 litros de agua de mar estéril con medios nutritivos Miquel A, Miquel B (principalmente formas de nitrógeno y fósforo), oligoelementos, antibióticos y óxido de germanio para evitar proliferaciones de diatomeas.

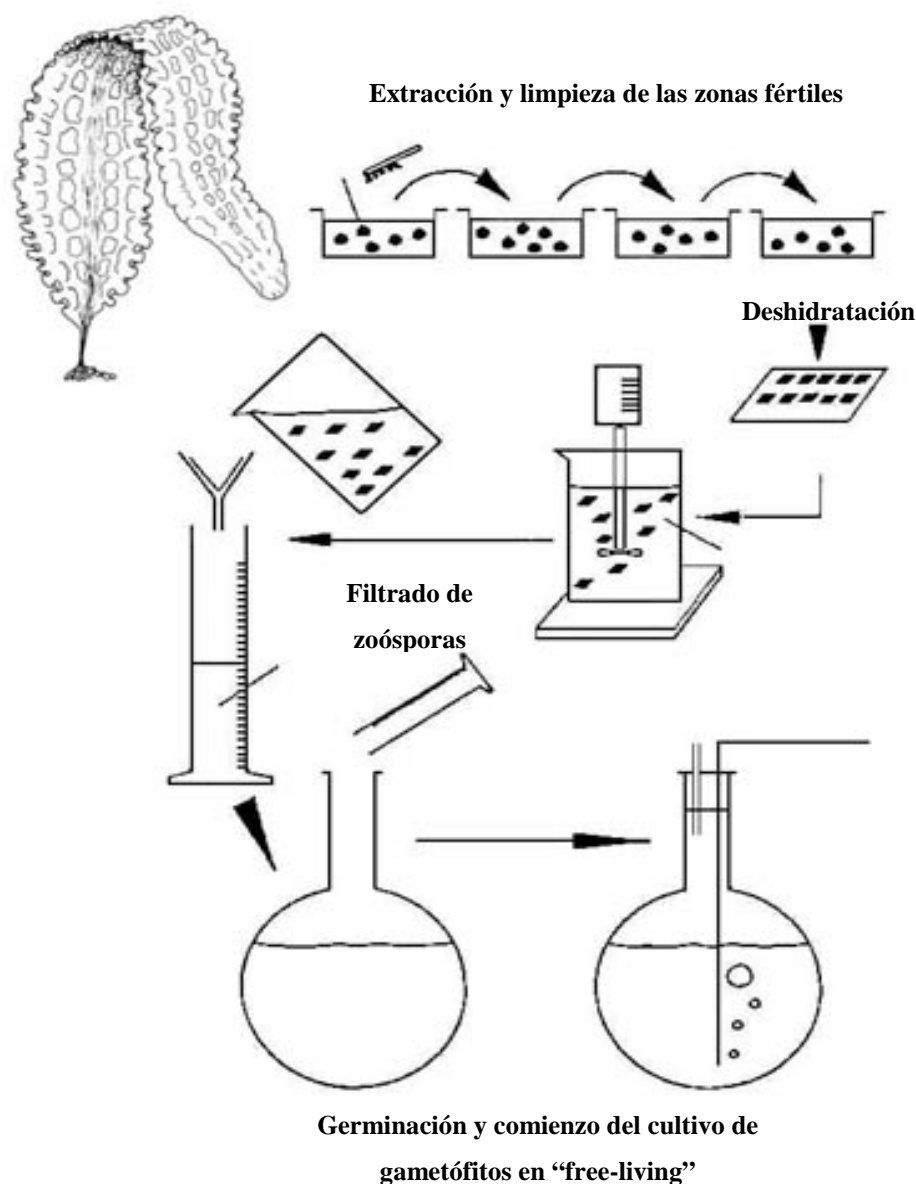


Figura 2-4. Método tradicional de obtención de gametofitos en “free-living”.

Para la germinación de las zoósporas, es necesario que previamente se fijen, aunque posteriormente, para el desarrollo correcto del cultivo en “free-living” se haga necesario que éstas permanezcan en suspensión. Esta contradicción metodológica se resuelve en el método tradicional mezclando los dos medios Miquel A y B a pH estable de tal forma que se obtiene un precipitado microcristalino de fosfato cálcico que sirve como sustrato donde germinan las esporas. Este método tradicional fue sustituido en la Planta de Cultivo de Algas del IEO en Santander por un método más seguro y sencillo en el que se emplean para la fijación cajas de cultivo celular a cuyas superficies se adhieren las esporas que, una vez germinadas y desarrollados los gametófitos éstos son resuspendidos mediante el empleo de ultrasonidos para su posterior cultivo en “free-living” en botellones. Los detalles concretos de esta técnica pueden ser consultados en Salinas Morrondo (2011).

Una de las grandes ventajas del cultivo de gametofitos en “free-living” es que permite tener un cultivo permanente de los mismos, además de la obtención de grandes cantidades de gametófitos por desdoblamiento de los cultivos, con una total independencia del ciclo de maduración de los esporófitos. Permite también una perfecta trazabilidad genética.

2-3.2.iii. Inducción a la gametogénesis

El siguiente paso consiste en la inducción de la gametogénesis (fig. 2-5), que tiene lugar en cámaras climatizadas, variando las condiciones de luz (intensidad y fotoperíodo) y temperatura. Finalmente, para el buen mantenimiento de los cultivos, es preciso el fraccionamiento de gametófitos, desdoblamiento de cada cultivo y determinación de la sex-ratio, con el fin de realizar las mezclas más apropiadas antes de la operación de la siembra de colectores. Al término de este proceso ya son fácilmente distinguibles los gametocistes masculinos y femeninos.

2-3.2.iv. Siembra de los gametófitos maduros sobre los colectores y fecundación

La siembra de gametófitos maduros se realiza proyectando directamente el cultivo con un nebulizador sobre los colectores. Éstos están formados por un soporte cilíndrico de malla metálica plastificada, sobre el cual se enrolla un hilo de poliamida de tres hebras trenzadas y de 2 mm de diámetro, que se trata previamente para proporcionarle una textura apta para la fijación de gametófitos y el posterior desarrollo y supervivencia de las jóvenes plántulas (Salinas *et al.*, 2006).

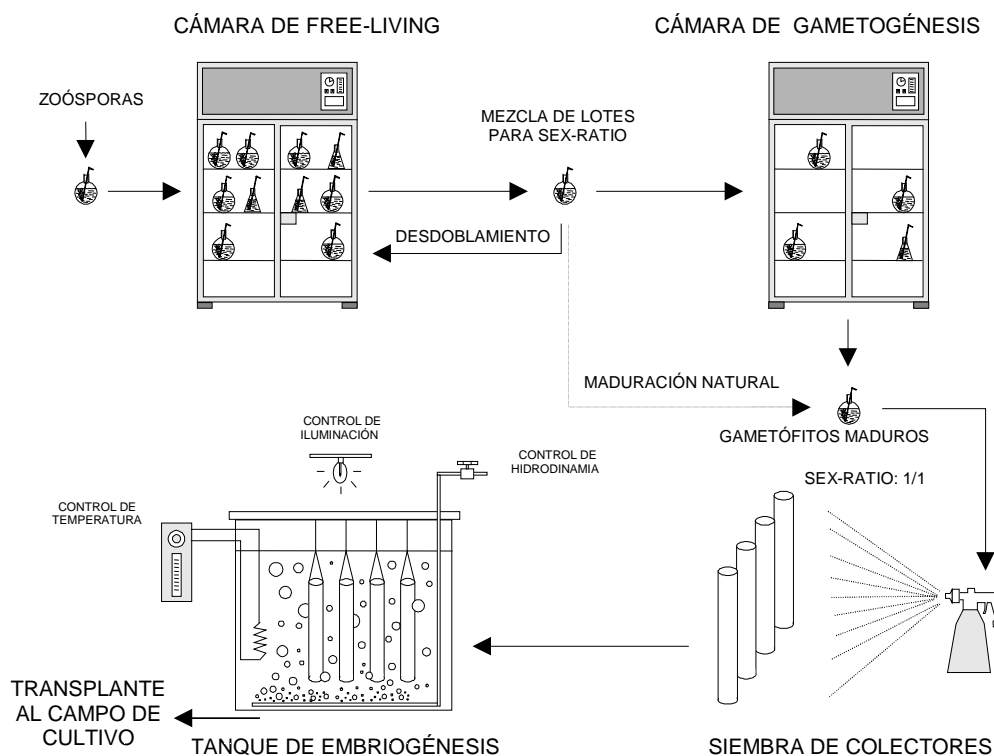


Figura 2-5. Esquema de las fases de producción de plántulas por “free-living”.

Una vez sembrados los colectores son sumergidos en tanques de embriogénesis isotermos donde se produce la fecundación, la obtención de embriones y el desarrollo de las plántulas. La embriogénesis es provocada variando fundamentalmente el fotoperíodo, incrementando la proporción de luz azul y disminuyendo la hidrodinámica para, de este modo, asegurar la fecundación y evitar el posible desprendimiento de gametófitos.

2-3.2.v. Obtención de jóvenes plántulas

Aproximadamente una semana después de la siembra son visibles cigotos y embriones de dos o más células. Con la paulatina presencia de embriones, se incrementa la luz e hidrodinámica, a la vez que se reduce la temperatura y se inician cambios del medio de cultivo cada tres días. Transcurridos aproximadamente 20 días de cultivo, modificando paulatinamente los parámetros físico-químicos del medio se fomentará el crecimiento de los embriones. A pesar de tratarse de un cultivo sincrónico, es normal en el hilo de semilla la presencia de todos los estadios embrionarios e, incluso, de gametófitos sin fecundar.

Transcurrido aproximadamente un mes y medio desde la introducción de los colectores en los tanques se alcanza la fase de semilla. Las jóvenes plántulas tienen ya una longitud

de 2-3 mm, presentan una incipiente zona poliestromática y se encuentran con una densidad media de 19 plántulas por milímetro de hilo, muy superior a la necesaria para el cultivo en la fase adulta. En este estado los colectores pueden ser ya enviados al mar para la realización de la siembra.

2-3.2.vi. Transporte de la semilla del laboratorio al mar

El transporte al mar se realiza en contenedores de polietileno en los que se acondicionan envueltos en gasa de nylon, en oscuridad y humectación continua. Si la siembra va a ser de tipo japonés también es posible cortar los hilos de los colectores en origen al tamaño que van a ser usados para la siembra y trasportarlos envueltos en gasas húmedas, de esta forma se ahorra considerablemente los gastos de transporte por el pequeño volumen del envío.

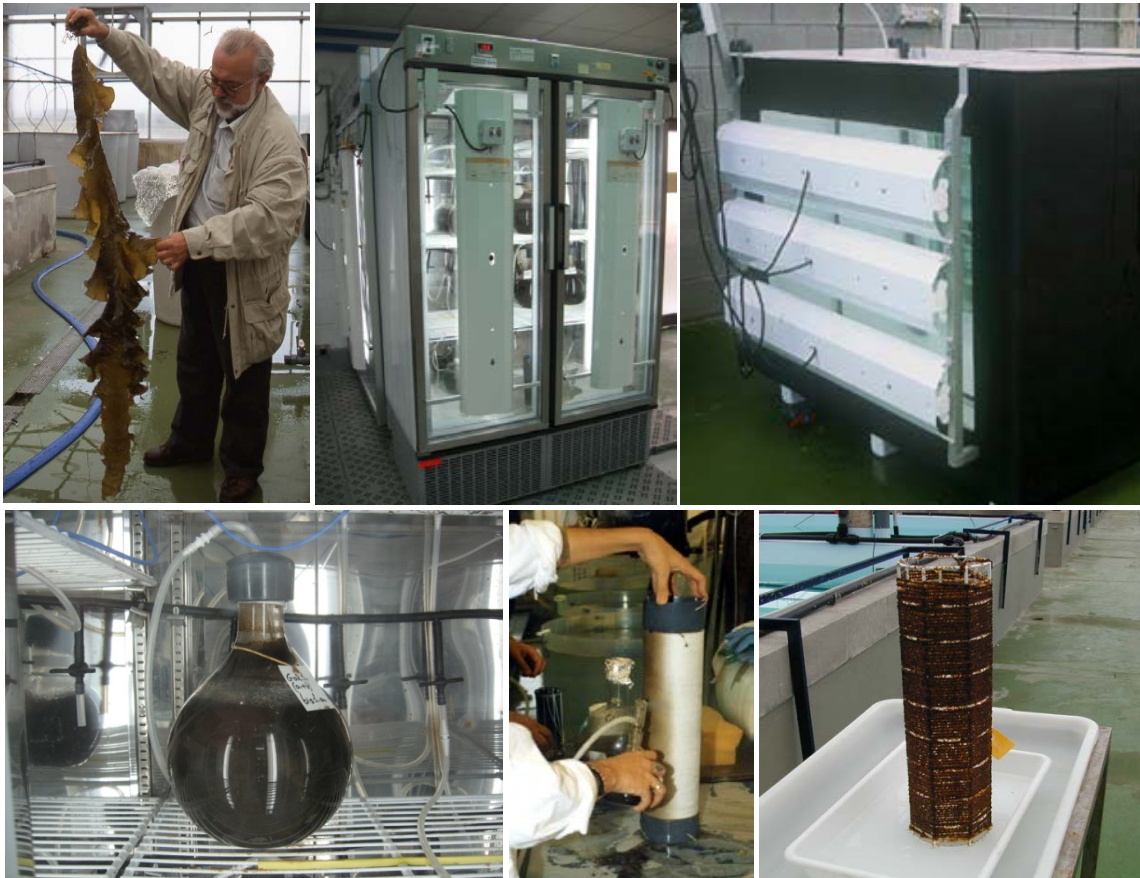


Figura 2-6. Algunas fases de la producción de plántulas de *S. latissima* por la técnica de “free-living” en la Planta de Cultivo de Algas del IEO en Santander. Juan Manuel Salinas con uno de sus reproductores, cámara de “free-living”, tanque de gametogénesis, botellón con “gametofitos en “free-living” maduros, siembra de gametofitos sobre el hilo de semilla y colector listo para la siembra en mar después de su paso por el tanque de embriogénesis.

2-3.3. Cultivo “outdoor” e “indoor” de *Saccharina latissima*

Una vez obtenidos los colectores con plántulas lo más habitual es que sean utilizados para cultivos en el mar (“outdoor”) mediante la siembra de cabos de cultivo por distintos métodos (continua o por tramos), cabos que se dispondrán en el mar siguiendo diferentes sistemas de conducción (vertical, horizontal, en “v”, etc.). Por el contrario, es posible que el cultivo se realice en tierra (“indoor”) mediante la suspensión de plántulas en tanques con aireación, en este caso previamente se desprenderán las plantas del hilo de semilla aumentando el hidrodinamismo. Ejemplos de ambos tipos de cultivos pueden ser examinados en la fig. 2-7.



Figura 2-7. Dos aspectos del cultivo de *Saccharina latissima*. A la izquierda cultivo en mar sobre cuerdas verticales y a la derecha cultivo en tanque en suspensión de jóvenes plántulas.

*Sección III – Desarrollo y optimización
de las técnicas de cultivo “outdoor” de
Saccharina latissima y estudio de su
integración en sistemas multitróficos*



Capítulo 3 - Evaluación de los sistemas de conducción

3-1. Introducción, antecedentes y objetivos

Dentro de las distintas experiencias de cultivo industrial de *Saccharina latissima* realizadas en mar abierto entre 2009 y 2014 en la concesión administrativa de carácter experimental que la empresa conservera PORTO-MUÍÑOS S.L. tiene en la Ría de Ares y Betanzos, en este capítulo se exponen los resultados obtenidos en ellas con relación a la influencia de los sistemas de conducción en la optimización y mejora de las cifras de producción y calidad de la cosecha.

Aunque se llevan muchos años realizando experiencias de cultivo de esta especie en dicha concesión no es más que desde hace poco tiempo que se emplean métodos de disposición de cuerdas en vertical, ya que hasta 2005 la técnica más empleada era la de líneas en horizontal (Peteiro *et al.*, 2006; Peteiro & Freire, 2009, 2013), como se venía haciendo en la mayoría de los países europeos. Pero desde 2006 las experiencias que se realizan son siempre en cuerda vertical o similar por razones tanto de productividad como de facilidad de manejo y mejor adaptación a las prácticas empresariales y destino de la producción (Cremades *et al.*, 2007).

Como se verá en este capítulo, año a año se fueron probando distintos sistemas de conducción como respuesta al análisis de las cifras de producción y calidad comercial de las sucesivas cosechas, así como de la influencia de las variaciones en las condiciones ambientales o procesos de depredación sobre ellas. Por ello se han ensayado sistemas de conducción en cuerda vertical y en cuerdas en “v” en dos distintos sentidos y también se ensayó un sistema de protección con redes aplicable en el caso de que en el futuro estos fenómenos debieran ser controlados.

El objetivo último de estas experiencias es proponer el sistema de conducción y manejo del cultivo más adecuado para la obtención de las mejores cifras de cosecha de *Saccharina latissima* de calidad alimentaria con la mayor rentabilidad económica. Se pretende también conocer la variabilidad interanual de las cosechas y las relaciones que esto tiene con las condiciones ambientales mediante el período de cultivo.

3-2. Metodología general

3-2.1. Ubicación de las experiencias

Las experiencias de cultivo se realizaron en la Ría de Ares y Betanzos, situada al oeste de la provincia de A Coruña y que forma, junto con las rías de A Coruña y de Ferrol, el denominado Golfo Ártabro. Esta ría tiene 15 km de largo por 5 de ancho y su costa es de naturaleza acantilada y está compuesta principalmente por esquistos y cuarcitas que forman una línea de costa muy recortada con muchos salientes, bajos rocosos y pequeños islotes, salpicada con playas pequeñas de arena fina (MOPU, 1981). La profundidad media oscila de 9 a 15 m, aproximándose la máxima a los 25 m.

El clima de esta ría, según la clasificación de Papadakis (1966), es mediterráneo marítimo. Se caracteriza por temperaturas suaves, con una media anual de 12,3° C y con una oscilación térmica de 8,5° C. Los veranos son suaves, al igual que los inviernos, en los que la temperatura media del mes más frío (enero) es de 8,2° C, mientras que en verano no excede de los 16,7° C (julio y agosto) por la influencia de los afloramientos de masas de agua fría que se producen en la época estival (Rey Salgado, 1993).

Las precipitaciones son relativamente abundantes, en torno a los 876 mm anuales, distribuidas a lo largo del año con los máximos en otoño-invierno, siendo el mes de julio el más seco, con 21 mm, y diciembre el más lluvioso, con 113 mm (Carballeira *et al.*, 1983). Además de los aportes de agua dependientes de las lluvias existe también un abundante aporte fluvial por parte, principalmente, de los ríos Mandeo, Eume, Lambre, Mero y Bajoy, que incorporan sedimentos y nutrientes a la ría.

La principal característica oceanográfica de las rías gallegas son los episodios de afloramiento que en ellas acontecen. Este proceso no es aislado, sino que sucede dentro de un afloramiento general producido por un giro anticiclónico noratlántico que se extiende desde Galicia hasta Cabo Verde, coincidiendo su intensidad en Galicia con el desplazamiento anual de dicho sistema (Fraga, 1981). El afloramiento de estas aguas ocasiona un descenso de la temperatura y un aumento de la salinidad, al tiempo que aporta una gran cantidad de nitratos y fosfatos, alcanzando sus máximos en los meses de junio y julio, coincidiendo con los afloramientos más intensos (Fraga, 1967). Se puede por ello decir que en esta ría acontecen dos patrones de circulación de agua: la entrada en

profundidad del agua rica en nutrientes procedente de los fenómenos de afloramiento y la salida de agua continental superficial rica en nutrientes (de Castro *et al.*, 2000).

El régimen de mareas general para el NO de la Península Ibérica es semidiurno, con una amplitud media de 4 metros. Las corrientes de marea pueden llegar a alcanzar velocidades cercanas a los tres nudos, discurriendo durante la fase de llenante en dirección norte, mientras que la fase vaciante ocasiona corrientes en dirección sur. Este régimen general de corrientes puede verse alterado en función de la dirección de los vientos dominantes (Rey Salgado, 1993). A la zona de estudio las corrientes generales le afectan a pequeña escala, ya que éstas tienen mayor importancia en la boca de la ría. Las corrientes locales inducidas por el viento y la marea son las de mayor influencia; su acción de flujo tiene dirección oeste y la de refluo hacia el este, ambas con velocidades que pueden alcanzar las dos millas por hora (Grajal, 1990). Las direcciones de los vientos de mayor frecuencia son, en enero, los provenientes del S; en abril, julio y octubre los N y NE, y en todo el período primavera-verano los del NO, N y NE, con una media general para toda la ría de 10-20 km/h (Grajal, 1990).

Las experiencias de cultivo se desarrollaron concretamente en el polígono de cultivos marinos SADA II de la Ría de Ares-Betanzos, localmente conocido como el polígono de Punta Arnela, en una concesión administrativa de carácter experimental de la que es beneficiaria como ya se dijo la empresa conservera PORTO-MUIÑOS S.L. Las coordenadas de la cuadrícula utilizada son: 43° 22' 42" N; 8° 15' 36" O (fig. 3-1), la batimetría de la zona oscila entre los 10-14 m y el fondo es arenoso. La cuadrícula utilizada para la experiencia está enclavada, por imperativo legal, en un polígono de cultivos marinos, siendo por ello abundantes en sus proximidades las bateas de mejillón y las jaulas para el cultivo de peces. Actualmente en este polígono hay c. 30 bateas de mejillón y la producción anual de cada una está estimada entre 33-48 t de mejillón (Pérez-Camacho *et al.*, 1991). Los mejillones producen una gran cantidad de detritos que Cabanas *et al.* (1979) estiman en aproximadamente 190 kg en peso seco por batea y día, de los cuales 31,6 kg es materia orgánica, 14,3 kg de C orgánico y 1,7 kg de N orgánico. Por ello se asume que las aguas que rodean al cultivo de *Saccharina latissima* están enriquecidas con residuos orgánicos e inorgánicos de la actividad metabólica de estos organismos.

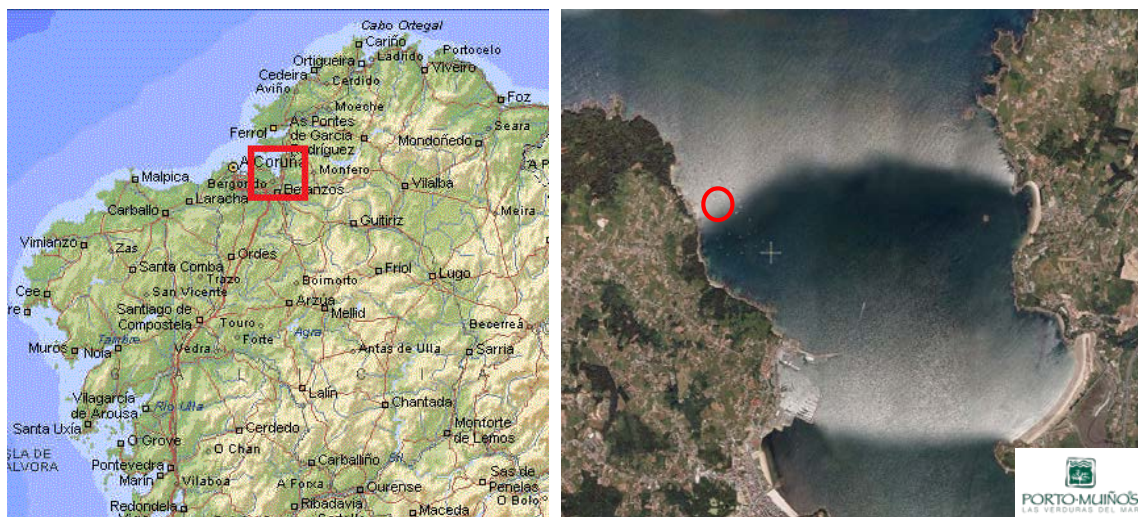


Figura 3-1. Ubicación geográfica del cultivo de *Saccharina latissima* en el polígono de cultivos marinos SADA II (Punta Arnela, Ría de Ares y Betanzos).

3-2.2. Diseño del parque de cultivo y seguimiento ambiental

El parque de cultivo flotante consistió en líneas dobles de 70 m de longitud separadas 1,5 m y unidas entre sí mediante flotadores transversales de 200 o 350 litros dispuestos cada 5 metros. Las líneas son reflotadas cada metro con boyas de 3 litros de flotabilidad y están unidas en sus extremos a sendas boyas de 500 litros de flotación y balizamiento fondeadas con bloques de hormigón de 2 t. Las líneas se mantienen extendidas horizontalmente en la dirección de la corriente por medio del contrapeso de cadena que llevan en uno de los cabos tensores (fig. 3-2). El método de siembra utilizado en todas las experiencias fue el conocido como japonés. En él, los hilos de semilla son cortados en fragmentos de unos 5 cm de longitud que se introducen, tras abrirlo, en el interior del cabo de cultivo de polipropileno de 19 mm de diámetro cada 10-15 cm.

Para el seguimiento de la temperatura del agua se colocaron en el parque a 1m de profundidad sensores que registran y almacenan datos cada 15 minutos mediante “data loggers” HOBO® Pendant (Onset Computer Corporation, USA).

En algunas de las experiencias que se describen seguidamente también fueron analizadas otras variables ambientales como la dinámica de mareas, pluviosidad y grado de insolación. Estos datos fueron obtenidos de la web pública Meteogalicia (www.meteogalicia.es).

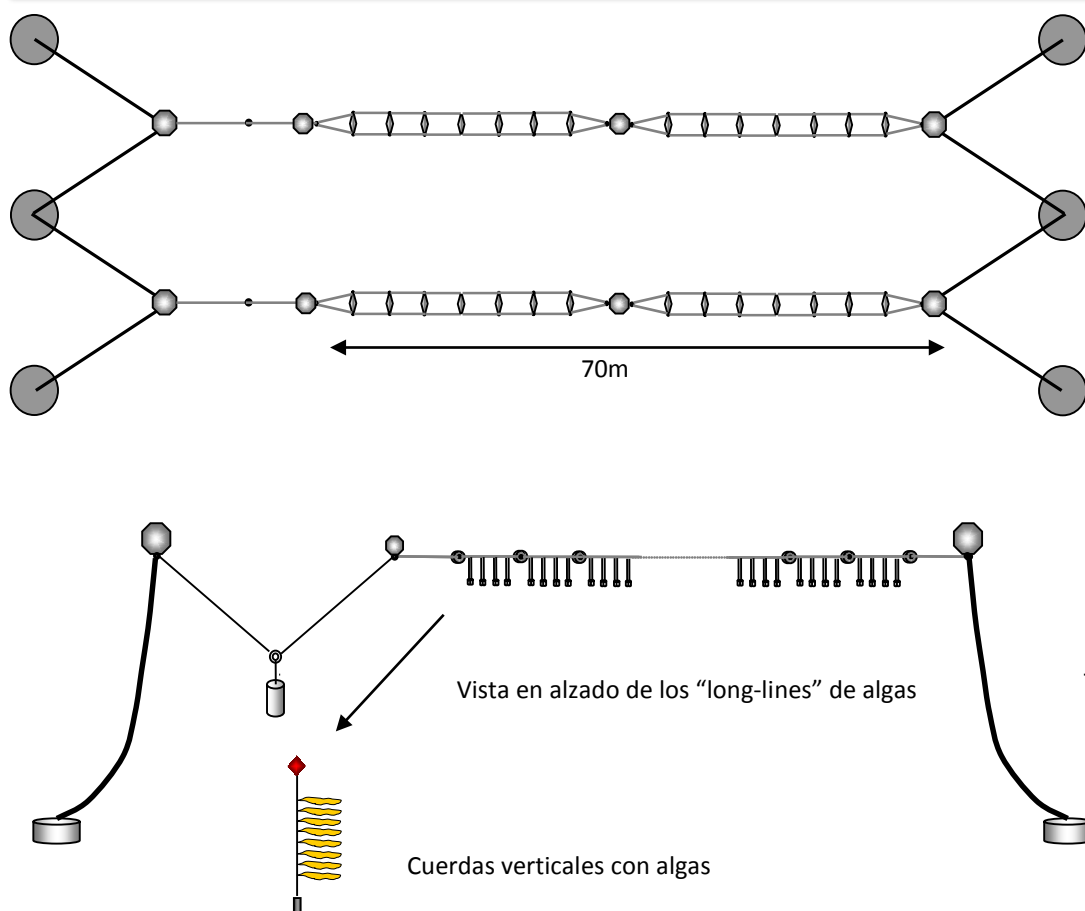


Figura 3-2. Diseño de las estructuras y de las líneas ("long-lines") para el cultivo de algas.

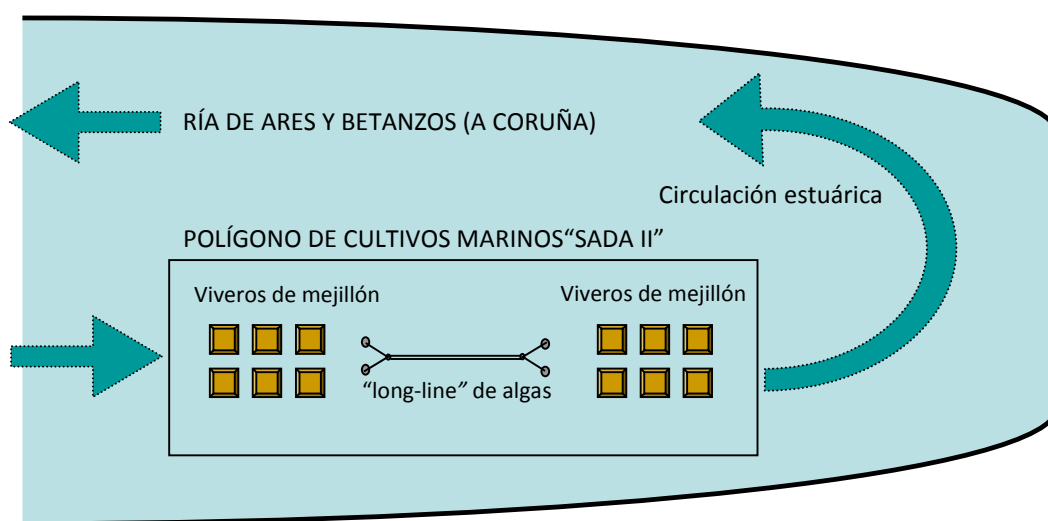


Figura 3-3. Esquema del diseño del parque de cultivo y de su disposición con respecto a los viveros de mejillón.

3-2.3. Muestreos y análisis de datos

Los muestreos en todas las experiencias fueron de tipo destructivo, es decir, se recogieron dentro del parque, al azar, cuerdas de cultivo enteras que eran trasladadas al laboratorio. Esta operación era realizada con la máxima brevedad para evitar el deterioro de las muestras.

Una vez en el Laboratorio de Algas Marinas de la Facultad de Ciencias de la Universidad de A Coruña se procedía a la toma de biometrías de los distintos ejemplares recolectados (fig. 3-4), a los que se les media la longitud y anchura máxima de la lámina con un calibre de precisión 0,01 mm y una cinta métrica con precisión de 0,001 m, respectivamente, y el peso húmedo en una balanza Adam Equipment Co. Ltd. Modelo RS-232 de precisión de 0,001 g, para las primeras muestras más pequeñas, y una balanza MOBBA Mod. MINI de precisión 0,001 kg, para las muestras más grandes. También de cada ejemplar se apuntaba su estado fenológico (presencia/ausencia, longitud y grado de madurez del soro de esporocistes) y el grado de cobertura por epifitos y su naturaleza.



Figura 3-4. Proceso de realización de las biometrías y otras observaciones en el laboratorio.

Las tasas de incremento tanto del peso de los implantes como del peso, longitud y anchura de los distintos ejemplares examinados fueron calculadas según la ecuación de tasa de crecimiento relativo (TCR) de Hunt (1982):

$$TCR_X = (LnX_t - LnX_o) / t$$

donde X_o y X_t son los valores iniciales y finales de cada variable y t es el número de días de cultivo. Los análisis estadísticos se realizaron con el software StatGraphics® Centurion XV, con el que obtuvieron los estadísticos descriptivos, se realizaron las gráficas y los análisis ANOVA y de grupos homogéneos.

3-3. Sistemas de conducción ensayados

En este apartado se resumen las experiencias realizadas con dos tipos de conducción distintos: en cuerda vertical y en cuerdas en “v”. Esta segunda disposición se ensayó con la idea de minimizar en lo posible los procesos de estratificación vertical sin la necesidad de renunciar a colocar las cuerdas en vertical y también porque permite la colocación de sistemas de protección frente a la depredación temprana. La última experiencia estudia la influencia sobre la producción de la colocación de las cuerdas en “v” en dirección transversal o longitudinal con respecto a la línea del parque.

3-3.1. Primera experiencia: Siembra en vertical

3-3.1.i. Introducción

Esta experiencia está inspirada en las conclusiones de Cremades *et al.* (2007) en las que se aconseja como mejor estrategia productiva para el cultivo en mar de *Saccharina latissima* el uso de cuerdas dispuestas en vertical en el parque de cultivo, pero sembradas tan solo en un metro de su longitud, ya que según estos autores siembras de tramos mayores, al menos en Galicia, no son rentables desde el punto de vista productivo por la fuerte estratificación vertical que se produce en profundidad por el marcado ensombrecimiento de los ejemplares superficiales sobre los más profundos y por la propia turbidez natural de las ricas aguas de las rías gallegas.

3-3.1.ii. Diseño de la experiencia

En esta experiencia se utilizaron cuerdas de 2 m de longitud que fueron sembradas en un metro de su longitud con implantes de hilo de semilla de 5 cm insertados en la cuerda a intervalos de 10 cm (11 implantes por metro). Estas cuerdas fueron suspendidas en el parque de cultivo el 27/11/2009, separadas 1 m, en cada una de las pequeñas boyas de superficie y con un pequeño muerto en su extremo para que se mantuvieran tensas. Se hicieron 3 muestreos destructivos: 05/02/2010 (70 días de cultivo); 10/03/2010 (102 días de cultivo) y 17/04/2010 (140 días de cultivo, cosecha final). En cada fecha de muestreo fueron extraídas al azar dentro del parque 5 cuerdas y, de cada una de ellas, se recolectaron 3 implantes para su análisis en el laboratorio: el 1° (superficie), 6° (0,5 m de profundidad) y el 11° (1 m de profundidad). Este diseño experimental tiene por objeto investigar la posible influencia de la localización de las cuerdas y profundidad del cultivo tanto en las cifras de producción como en las biometrías individuales. Después de pesar los implantes fueron separados de cada uno los 5 ejemplares más pesados para realizar las biometrías (largo y ancho de la lámina), estado fenológico (presencia o ausencia de soro de esporocistes) y el grado de cobertura de la lámina por epifitos.



Figura 3-5. Líneas de cultivo (“long-lines”) y detalle de una de las cuerdas de cultivo verticales en el segundo muestreo (10/03/2012) de la primera experiencia en cuerda vertical.

3-3.1.iii. Resultados y discusión

3.3.1.iii.1 Evolución de los parámetros ambientales

Como se puede observar en la figura 3-6, la temperatura del agua durante toda la experiencia fluctuó entre los 11,5° C en enero hasta los 15,7° C en el mes de abril, momento de la cosecha. Se aprecia también que desde el mes de diciembre hasta mediados de marzo fue descendiendo de forma paulatina desde los 15° C hasta los 12° C, con algunas acusadas bajadas esporádicas. A partir de mediados de marzo se incrementó con gran rapidez hasta los 14° C y, posteriormente, casi los 16° C.

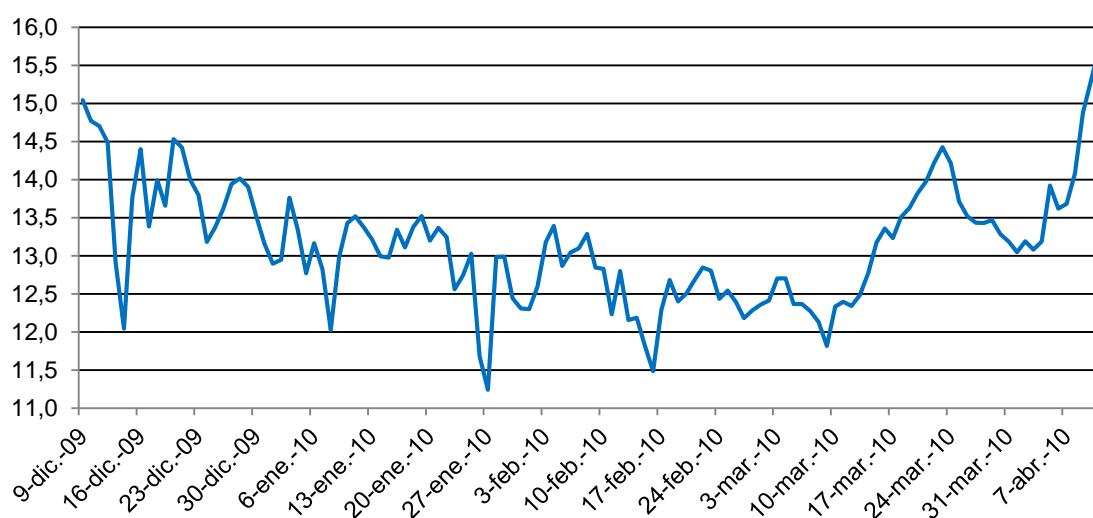


Figura 3-6. Evolución de la temperatura (° C) durante el período de cultivo.

3.3.1.iii.2 Variables morfológicas, tasas de crecimiento y producción

En esta primera experiencia, la cosecha final después de 140 días de cultivo fue de $20,67 \pm 3,19$ kg/m (tab. 3-1). Las tasas de crecimiento (tab. 3-2), muestran que el mayor incremento es en peso, seguido de la longitud de la lámina y, finalmente, la de su anchura. Es por ello que a medida que las algas crecen son cada vez más alargadas y pesadas debido al paulatino incremento de su grosor. La tasa más alta de crecimiento fue en el incremento de peso en el primer muestreo, a partir del cual todas ellas van disminuyendo gradualmente hasta el momento de la cosecha. La tasa de crecimiento en longitud es la que más decrece, posiblemente debido al mayor deterioro y pérdida de fragmentos apicales de la lámina a medida que nos acercamos al momento de la recolección.

	<i>fecha</i>	<i>n</i>	<i>media</i>	<i>min.</i>	<i>max.</i>
<i>Producción (g/m)</i>	17/04/10	15	20.669,7±3,19	6.006,0	47.520,0
<i>Peso implantes (g)</i>	05/02/10	15	160,533±13,408	92,0	300,0
	10/03/10	15	682,6±97,54	215,0	1.690,0
	17/04/10	15	1.879,07±290,76	546,0	4.320,0
<i>Peso lámina (g)</i>	05/02/10	75	15,492±0,754	6,2	36,9
	10/03/10	75	54,508±2,438	12,5	98,5
	17/04/10	75	143,28±6,247	34,0	264,0
<i>Largo lámina (cm)</i>	05/02/10	75	56,92±1,398	32,0	85,0
	10/03/10	75	112,24±2,41	63,0	152,0
	17/04/10	75	161,907±4,254	80,0	240,0
<i>Ancho lámina (cm)</i>	05/02/10	75	9,16±0,201	6,0	15,0
	10/03/10	75	13,747±0,319	8,0	20,0
	17/04/10	75	17,733±0,551	8,0	28,0

Tabla 3-1. Producción por metro el día de la cosecha y evolución de las variables morfológicas.

<i>Intervalo</i>	<i>variable</i>	<i>x_o</i>	<i>x_t</i>	<i>t (días)</i>	<i>TCR (%)</i>
27/11-05/02	<i>Peso implantes (g)</i>	0,056	160,533	70	11,37
	<i>Peso láminas (g)</i>	-	-	-	-
	<i>Largo láminas (cm)</i>	1,014	56,92	70	5,75
	<i>Ancho láminas (cm)</i>	0,232	9,16	70	5,25
05/02-10/03	<i>Peso implantes (g)</i>	160,533	682,6	32	4,52
	<i>Peso láminas (g)</i>	15,5	54,5	32	3,93
	<i>Largo láminas (cm)</i>	56,92	112,24	32	2,12
	<i>Ancho láminas (cm)</i>	9,16	13,74	32	1,27
10/03-17/04	<i>Peso implantes (g)</i>	682,6	1.879,07	38	2,66
	<i>Peso láminas (g)</i>	54,5	143,3	38	2,54
	<i>Largo láminas (cm)</i>	112,24	160,78	38	0,95
	<i>Ancho láminas (cm)</i>	13,74	17,73	38	0,67

Tabla 3-2. Tasas de crecimiento relativo de los implantes y de las principales variables biométricas de los individuos recolectados en los distintos muestreos.

Los ejemplares recolectados el día de la cosecha tuvieron un peso medio de 143,28 ±6,25 g, longitud y anchura medias de 161,97±4,25 y 17,73±0,55 cm, respectivamente. El peso medio de los implantes al final del cultivo fue de 1.879,07±290,76 g (tab. 3-2).

3.3.1.iii.3 Evolución de la fertilidad y grado de epifitismo

A lo largo de todo el período de crecimiento fue observado un incremento gradual del número de individuos fértiles. En la primera fecha de muestreo fueron encontrados soros de esporocistes en un 10% de los ejemplares, mientras que en el momento de la cosecha este porcentaje alcanzó el 93%. Por otro lado la cobertura de epífitos se incrementó y

generalizó de manera muy acusada en los últimos dos muestreos (tab. 3-3). Este incremento del grado de epifitismo es coincidente con el significativo aumento de la temperatura del agua al final del cultivo (fig. 3-6), aumento que anuncia la progresiva detención del crecimiento de las algas y la necesidad de realizar la cosecha.

	<i>fecha</i>	<i>n</i>	<i>media</i>	<i>min.</i>	<i>max.</i>
<i>Individuos fértiles (%)</i>	05/02/10	75	9,3	-	-
	10/03/10	75	33,3	-	-
	17/04/10	75	93	-	-
<i>Cobertura de epifitos (%)</i>	05/02/10	75	1,49±0,27	0	9,3
	10/03/10	75	3,63±0,15	1	6,5
	17/04/10	75	5,26±0,12	3,5	7,5

Tabla 3-3. Evolución de la fertilidad y grado de epifitismo de los ejemplares muestreados.

3.3.1.iii.4 Influencia de la profundidad y localización en las cifras de producción

Según el análisis ANOVA realizado no existen diferencias significativas en la producción en función de la localización de las cuerdas en el parque de cultivo (tab. 3-4).

<i>fecha</i>	<i>sitio</i>	<i>n</i>	<i>media (g)</i>	<i>p-valor</i>
05/02/2010	1	3	128,333	0,5657
	4	3	148,531	
	3	3	156,667	
	2	3	167,667	
	5	3	202,813	
10/03/2010	4	3	534,437	0,8385
	3	3	621,333	
	2	3	625,720	
	5	3	724,667	
	1	3	908,372	
17/04/2010	3	3	1.539,71	0,9391
	2	3	1.567,67	
	5	3	1.918,33	
	1	3	2.105,25	
	4	3	2.265,33	

Tabla 3-4. Influencia de la localización en la producción (ANOVA).

Sin embargo, se empiezan a manifestar diferencias significativas en la producción en función de la profundidad a partir del segundo muestreo ($p\text{-valor} = 0.0082$), diferencias que se exageran y acaban siendo significativas para todas las profundidades en el momento de la cosecha ($p\text{-valor} = 0,0001$) (tab. 3-5, fig. 3-7).

<i>fecha</i>	<i>profundidad (m)</i>	<i>n</i>	<i>media (g)</i>	<i>grupos homogéneos</i>	<i>p-valor</i>
05/02/2010	0	5	182,7	X	0,1185
	0,5	5	177,8	X	
	1	5	121,8	X	
10/03/2010	0	5	1.027,4	X	0,0082
	0,5	5	654,8	XX	
	1	5	365,6	X	
17/04/2010	0	5	3.223,4	X	0,0001
	0,5	5	1.422,4	X	
	1	5	991,4	X	

Tabla 3-5. Influencia de la profundidad en la producción (ANOVA).



Figura 3-7. Aspecto de las cuerdas de cultivo en el muestreo final (17/04/2010). Nótese de izquierda a derecha la paulatina diferencia de talla por la estratificación vertical del cultivo.

A pesar de que la producción de los implantes más profundos es todavía comercialmente rentable ($10,90 \pm 1.23$ kg/m), la estratificación vertical en esta experiencia fue mayor que la obtenida en experiencias previas (Cremades *et al.*, 2007). Una explicación plausible de esta gran estratificación es que el buen desarrollo de los

implantes superiores acontecido este año –que dieron una excelente producción media de $35,46 \pm 4,19$ kg/m- haya producido un fuerte ensombrecimiento de los niveles inferiores. Sin embargo, no podemos descartar una posible influencia también de la depredación temprana por peces herbívoros u omnívoros.

3-3.1.iv. Conclusiones

Experiencias previas en la misma ubicación en aguas gallegas indican que el mejor diseño desde el punto de vista productivo para el cultivo de esta especie consistiría en cuerdas verticales dispuestas a intervalos de un metro y sembradas solo en un metro de profundidad, ya que siembras en mayor longitud traen como consecuencia un significativo descenso de la producción en profundidad debido al autosombreo y turbidez de las aguas (Cremades *et al.*, 2007). La experiencia aquí expuesta apoya este diseño ya que la producción media obtenida de $20,67 \pm 3,19$ kg/m es significativamente superior a los $13,1 \pm 1,6$ kg/m obtenidos por estos autores con cuerdas sembradas en mayor longitud (2 m) y dispuestas de la misma forma y localidad. Además, la cosecha supera claramente los $6,2 \pm 1,5$ y $11,7 \pm 0,9$ kg/m obtenidos en otras experiencias realizadas con sistemas en “long-line” horizontales a 2 m de profundidad en períodos similares de cultivo y en la misma área productiva de Galicia (Peteiro *et al.*, 2006;. Peteiro & Freire, 2009); lo que viene a recalcar la bondad del sistema de conducción vertical.

3-3.2. Segunda experiencia. Siembra en “v” transversal

3-3.2.i. Introducción

Los resultados de la experiencia anterior indican que, a pesar de haber sembrado solo un metro de longitud de cuerda, hubo una significativa merma de la producción del cultivo de *Saccharina latissima* en profundidad. Esta merma se achacó al propio autosombreo del cultivo, pero no se descartó que en ella estuviera también implicada una posible depredación por peces. Este fenómeno de la depredación quedó claramente de manifiesto en la experiencia de cultivo realizada en el período 2010-2011 y que comprometió seriamente la producción. Esta experiencia pretendía ser análoga a la anteriormente expuesta, pero intentando mejorar aún más las cifras de producción aumentando la ventana de cultivo sembrando antes (15/10/2010) y utilizando semilla con

plántulas mayores (5 mm). En el primer muestreo realizado el 3/11/2010 se apreció un buen crecimiento de las plántulas, pero también se observó en algunas zonas que se estaba produciendo cierta depredación, sobre todo en los implantes más profundos alejados de las boyas principales. Esta depredación supuestamente es debida a peces de hábitos herbívoros como la salema (*Salpa salpa*) o la boga (*Boops boops*). El 29/11/2010 estaba programado un nuevo muestreo que finalmente no se llevó a cabo debido al pequeño tamaño de las algas consecuencia de intensa depredación que estaban sufriendo (fig. 3-8), por lo que la experiencia como tal se suspendió y para no perder el año experimental se diseñó una experiencia preliminar de trasplante en el mar de plantas grandes obtenidas en cultivo en suspensión y que se verá en el Capítulo 4 de esta memoria.

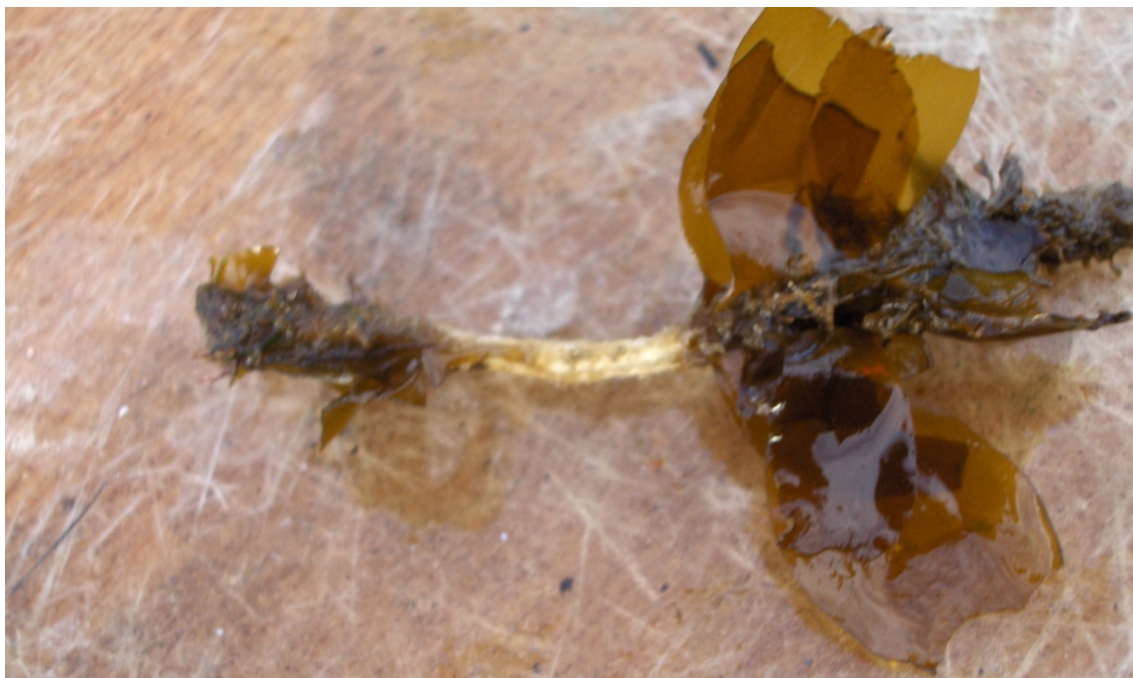


Figura 3-8. Implante de semilla de *Saccharina latissima* sacado de la cuerda de cultivo y en el que se aprecia la fuerte depredación sufrida (29/11/2010).

3-3.2.ii. Diseño de la experiencia

Para intentar evitar por un lado los problemas de depredación y también, en alguna medida, minimizar las pérdidas de producción en profundidad por autosombreo, en la experiencia de cultivo del período 2011-2012, que seguidamente se ofrece, se realizaron una serie de modificaciones en el sistema de conducción del cultivo, siendo la principal que las cuerdas se pusieron en forma de “v”. Para ello fueron fijadas por cada uno de sus extremos a las dos líneas paralelas superficiales del parque de cultivo y se les puso un

pequeño peso en su parte media, de manera que adquirían esa forma. También se instaló un sistema de barras y flotadores pequeños suplementarios para evitar que las líneas paralelas superficiales se aproximaran por la tracción del peso de las cuerdas y se perdiera entonces la pretendida disposición en forma de triángulo equilátero (fig. 3-9).

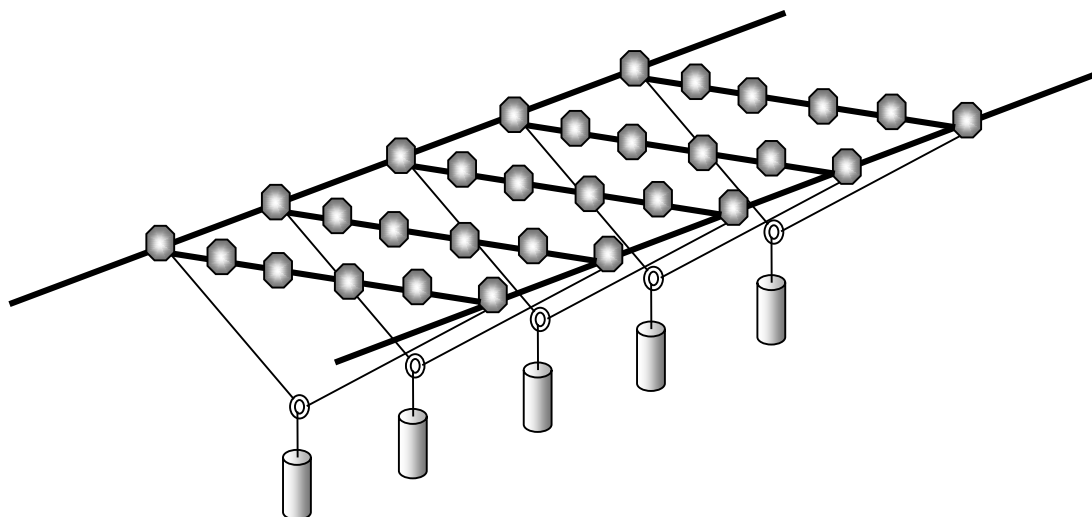


Figura 3-9. Diseño de las líneas de cultivo con la nueva disposición de las cuerdas en “v”.

Esta disposición de las cuerdas permite fácilmente evitar la depredación mediante la instalación de una red protectora en forma de bolsa durante las primeras fases de cultivo (fig. 3-11). La variación en la forma de colocación de las cuerdas se realizó también, como ya se indicó, para evitar la estratificación que se producía con el sistema de conducción en cuerda vertical, en donde la producción óptima se concentraba en los primeros 50 cm de profundidad debido, principalmente, al autosombreo de unas plantas sobre otras. La hipótesis de partida es que con este sistema en “v” se evitaría este problema en alguna medida ya que las cuerdas están a 45° de inclinación y dicho efecto de autosombreo debe mitigar en gran medida. Las cuerdas de cultivo tenían 3 m de longitud y descontada la longitud gastada por los nudos y la zona de disposición del contrapeso quedaban 2 m como distancia de siembra efectiva por cuerda, 1 m a cada lado del citado contrapeso. Los implantes de 5 cm de hilo de semilla fueron fijados a las cuerdas de 10-15 cm. Por otra parte, con la idea de optimizar en la medida de lo posible la ventana de cultivo en esta ocasión se utilizó una semilla con tamaño de plántula superior a la ensayada hasta el momento (con una media de 5 mm de longitud, fig. 3-10), por lo que para no dañarla se decidió fijarla en este caso mediante bridas de nylon en lugar de introducirla en el interior del cabo.



Figura 3-10. Ejemplo de implantes de semilla en el momento de la siembra.

El día 18 de noviembre de 2011 se realizó la siembra del parque y un día después se colocó la red protectora formada por varios paños de 4 m de ancho que que fueron cosidos entre sí para no dejar ninguna posible entrada a los depredadores.

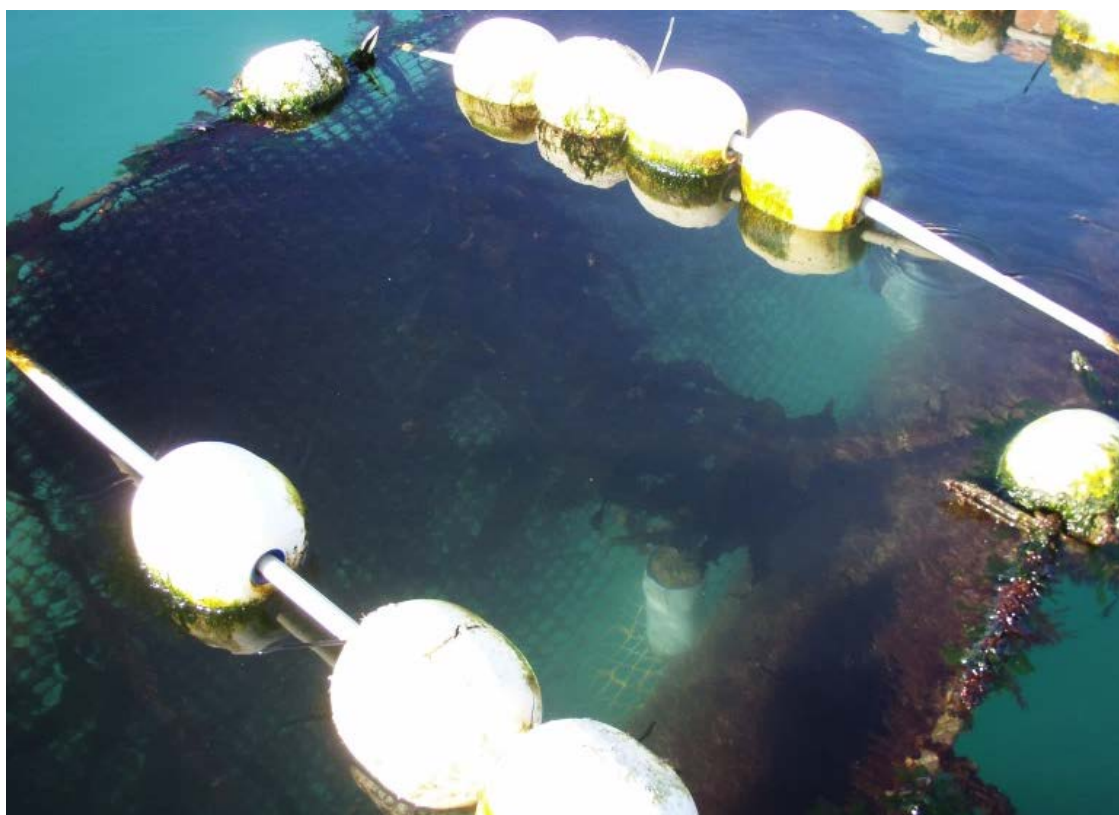


Figura 3-11. Vista del cultivo con la red de protección tras 54 días de cultivo (11/01/2012).

La red fue fijada a las dos líneas del “long-line” mediante bridas de plástico, quedando separada del cultivo gracias a los lastres que tenían las cuerdas de cultivo en el centro que, con su peso, la mantenían tensa, fig. 3-11.

La toma de muestras necesarias para el seguimiento del cultivo se inició el 21/12/2011 y se extendió hasta el 30/04/2012, momento en el que se realizó la cosecha final. En cada muestreo se recogieron 1 o 2 cuerdas de cultivo y las medidas y observaciones fenológicas o de grado de epifitismo se tomaron de los 3 ejemplares de mayor peso de cada uno de los implantes, trabajándose después con los datos de los 15 ejemplares de mayor peso de cada muestreo. La frecuencia de muestreo fue al principio aproximadamente mensual y, a partir del 5º muestreo, pasaron a hacerse de forma semanal (tab. 3-6). En esta experiencia se realizaron un alto número de muestreos con la idea de tener datos detallados de la evolución del crecimiento y poder así, además, estudiar los efectos que sobre el mismo pueden ser debidos a las variaciones de las condiciones ambientales como temperatura del agua, amplitud de mareas, pluviosidad e insolación.

<i>Muestreo</i>	<i>fecha</i>	<i>días de inmersión</i>	<i>días entre muestreos</i>
1	18/11/2011	0	0
2	21/12/2011	33	33
3	11/01/2012	54	21
4	11/02/2012	85	31
5	07/03/2012	110	25
6	15/03/2012	118	8
7	22/03/2012	125	7
8	29/03/2012	132	7
9	04/04/2012	138	6
10	12/04/2012	146	8
11	20/04/2012	154	8
12	27/04/2012	161	7
Cosecha	30/04/2012	164	3

Tabla 3-6. Datos de los muestreos realizados y días de inmersión acumulada y entre muestreos.

El día del 4º muestreo (11/02/2012) se procedió a la retirada de la red que protegía el cultivo de los posibles depredadores (fig. 3-12), ya que las algas presentaban ya un buen tamaño y se consideró que ya no era necesario seguir manteniéndola, porque los peces depredan ejemplares con un tamaño menor y, además, la red en este momento podría empezar a limitar el crecimiento de las algas por propio rozamiento y, también, por el “fouling” que se estaba desarrollando en la misma, que podría ejercer un efecto de sombra y una menor renovación del agua y nutrientes.



Figura 3-12. Vista del cultivo sin la red de protección tras 85 días de cultivo (11/02/2012).

A partir del 5° muestreo (07/03/2012) se comenzó a medir además otra variable, la del peso de una porción de la lámina de 5x5 cm, extraída de la parte central y media de cada ejemplar, que ya en este momento puede dar una idea del grosor que estaba adquiriendo la misma. A partir del 6° muestreo (15/03/2012) se empezó también a analizar la evolución del grado de epifitismo de las láminas midiendo la longitud de la misma por ellos colonizada. Los epífitos siempre se extienden de forma basípeta, desde el ápice de la lámina, la parte más vieja del alga, hacia la base de la misma, la parte más joven y activa y en donde se encuentra el meristemo de crecimiento.



Figura 3-13. Briozoo cubriendo completamente una lámina de *Saccharina latissima*.

El muestreo final se realizó el 30/04/2012, transcurridos 164 días desde el inicio de la inmersión. Este muestreo fue diferente ya que en él se realizaron medidas *in situ* de 5 cuerdas elegidas al azar. En cada cuerda se anotó el peso y posición de cada implante por separado y se recolectó su ejemplar más largo y pesado para realizar en el laboratorio las biometrías (longitud, anchura, peso húmedo y peso de 25 cm² de lámina) y otras observaciones sobre fenología reproductiva y grado de epifitismo.

3-3.2.iii. Resultados y discusión.

3.3.2.iii.1 Evolución de los parámetros ambientales

Como se puede observar en la figura 3-14, durante el período de cultivo la temperatura del agua varió de los 11,7° C en febrero hasta los 15,4° C en abril. Como en la experiencia de 2009-2010 (fig. 3-6), la temperatura fue descendiendo de manera paulatina desde los 15° C de diciembre hasta los 12° C de finales de febrero. A partir de este momento la temperatura fue ascendiendo, paulatinamente también, para incrementarse de manera muy acusada hasta más de 15° C la última semana de marzo y volver a descender la siguiente semana de forma también muy acusada.

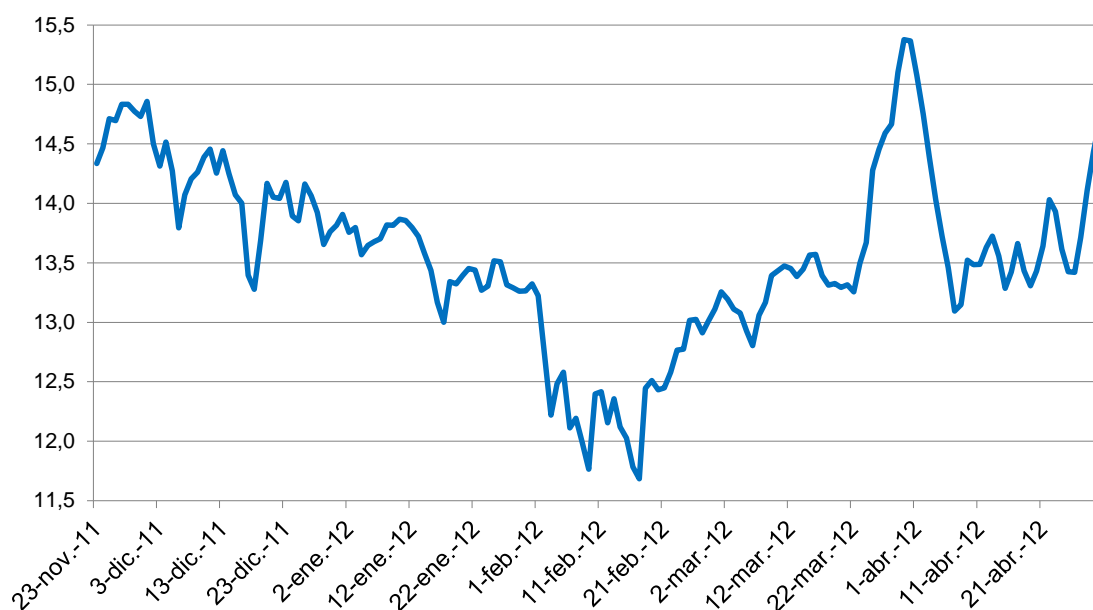


Figura 3-14. Evolución de la temperatura (° C) en el mar durante el período de cultivo.

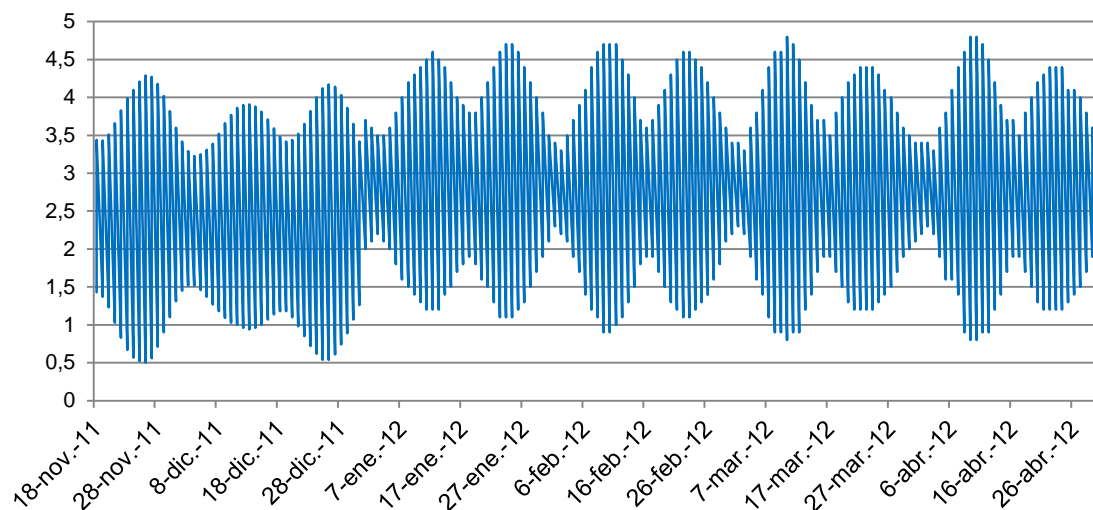


Figura 3-15. Amplitud de mareas (m) durante el período de cultivo.

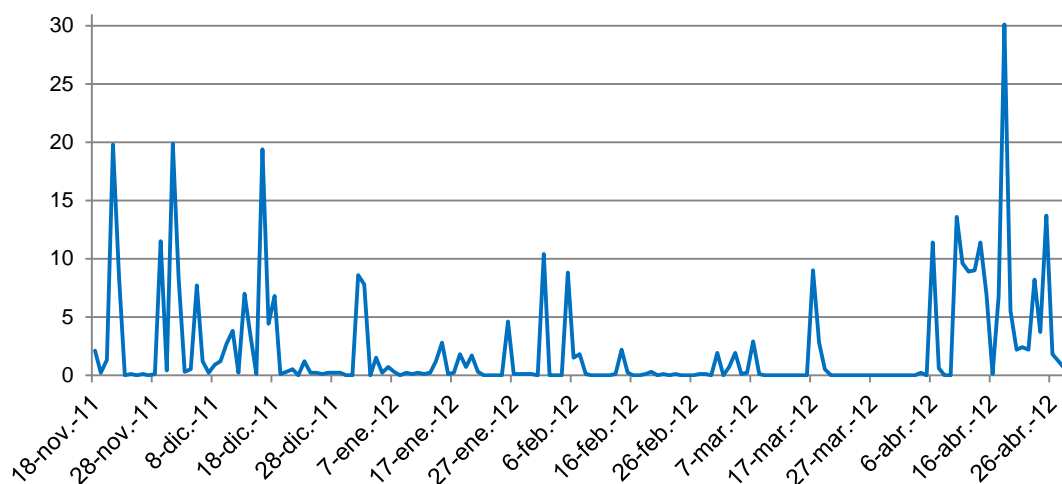


Figura 3-16. Precipitaciones (l/m^2) durante el período de cultivo.

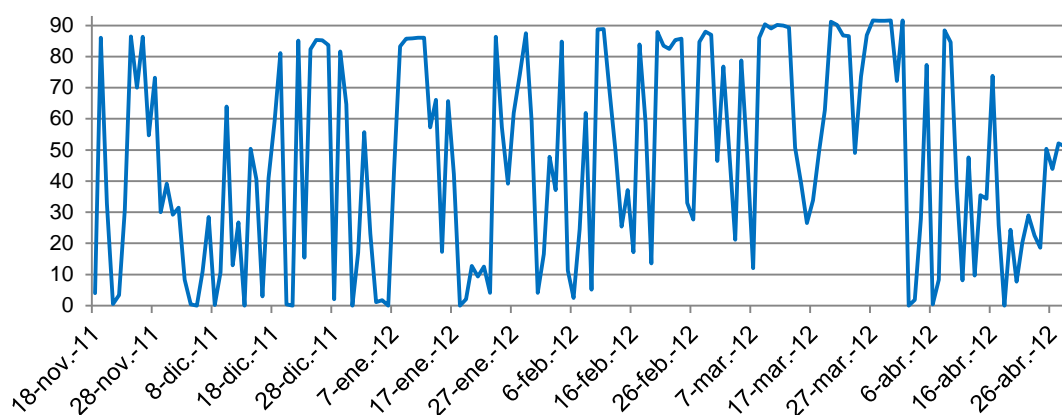


Figura 3-17. Porcentaje de insolación durante el período de cultivo.

Para valorar las variaciones de la dosis lumínica durante la fase de cultivo se consultó en Meteogalicia (meteogalicia.es) la variable “insolación”, que se define como la ratio (en %) entre las horas de sol medidas (intervalo de tiempo a lo largo del día en el que se registró radiación solar directa superior a 120 W m^{-2}) y las horas de sol teóricas producidas durante esos días.

3.3.2.iii.2 Variables morfológicas y tasas de crecimiento

A continuación en las figs. 3-19 a 3-23 y tabs. 3-7 a 3-12, se representan los principales datos y estadísticos descriptivos de las variables biométricas analizadas en los distintos muestreos, haciéndose distinción entre los muestreos 1 a 12 y el del día de la recolección de la cosecha, porque para este día, como ya se ha indicado, se utilizó una metodología diferente.



Figura 3-18. Pliegos con ejemplares recolectados en el 2º (izquierda) y 4º (derecha) muestreo.

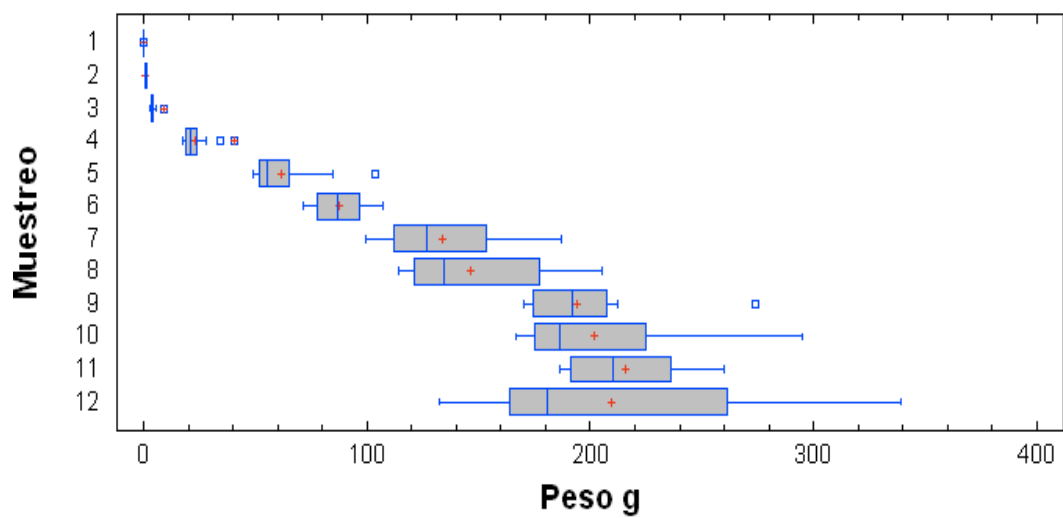


Figura 3-19. Gráfico de caja y bigotes del peso de los ejemplares en los muestreos.

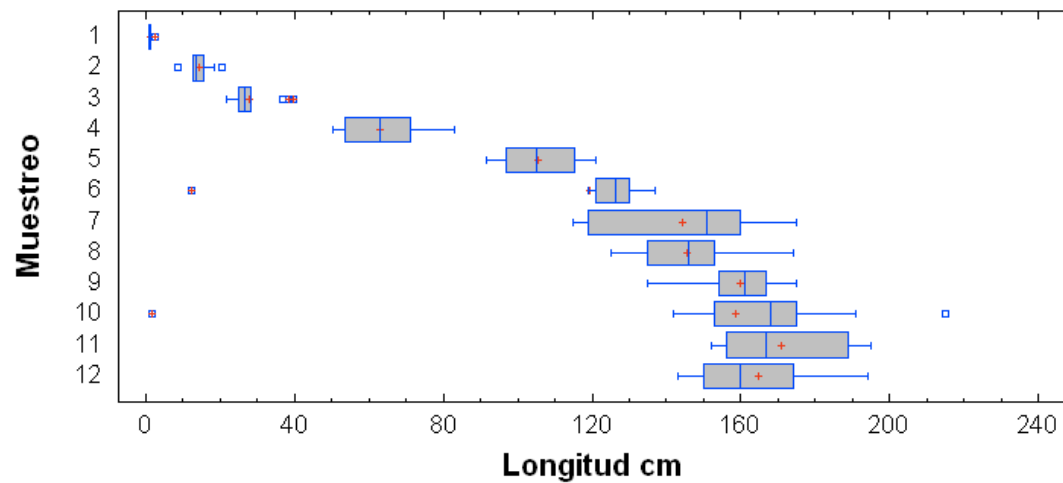


Figura 3-20. Gráfico de caja y bigotes de la longitud de los ejemplares en los muestreos.

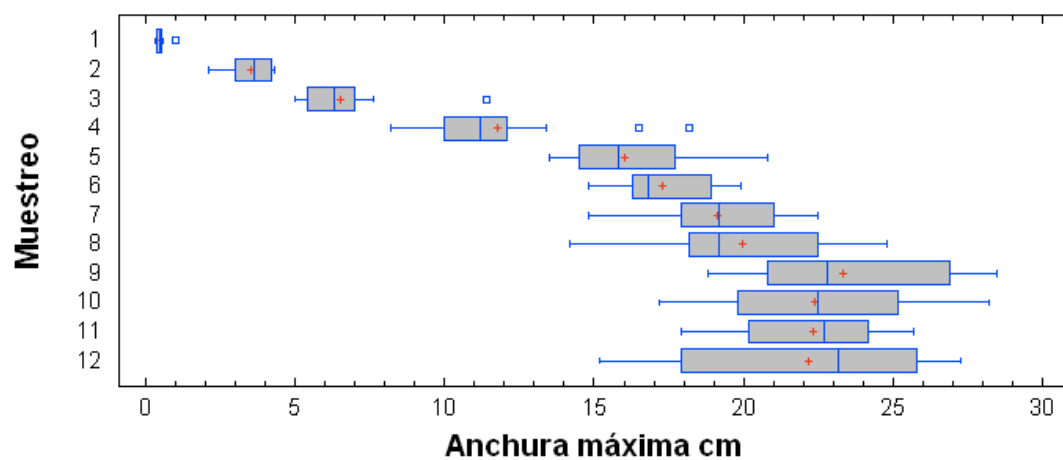


Figura 3-21. Gráfico de caja y bigotes de la anchura de los ejemplares en los muestreos.

<i>Muestreo</i>	<i>n</i>	<i>fecha</i>	<i>días de inmersión</i>	<i>media</i>	<i>desv. estándar</i>
1	15	18/11/2011	0	0,006	0,005
2	15	21/12/2011	33	0,825	0,339
3	15	11/01/2012	54	3,959	1,616
4	15	11/02/2012	85	23,161	6,453
5	15	07/03/2012	110	61,252	14,916
6	15	15/03/2012	118	87,170	10,508
7	15	22/03/2012	125	133,411	28,665
8	15	29/03/2012	132	146,294	29,415
9	15	04/04/2012	138	194,001	26,551
10	15	12/04/2012	146	201,834	37,013
11	15	20/04/2012	154	215,667	24,587
12	15	27/04/2012	161	209,667	60,738

Tabla 3-7. Estadísticos de la evolución del peso de los ejemplares en los muestreos.

<i>Muestreo</i>	<i>n</i>	<i>fecha</i>	<i>días de inmersión</i>	<i>media</i>	<i>desv. estándar</i>
1	15	18/11/2011	0	1,083	0,411
2	15	21/12/2011	33	14,328	2,834
3	15	11/01/2012	54	27,933	5,726
4	15	11/02/2012	85	63,106	10,563
5	15	07/03/2012	110	105,633	10,251
6	15	15/03/2012	118	119,567	30,053
7	15	22/03/2012	125	144,332	21,096
8	15	29/03/2012	132	145,648	13,206
9	15	04/04/2012	138	159,733	10,859
10	15	12/04/2012	146	158,575	47,117
11	15	20/04/2012	154	170,867	15,638
12	15	27/04/2012	161	164,867	15,977

Tabla 3-8. Estadísticos de la evolución de la longitud de los ejemplares en los muestreos.

<i>Muestreo</i>	<i>n</i>	<i>fecha</i>	<i>días de inmersión</i>	<i>Media</i>	<i>desv. estándar</i>
1	15	18/11/2011	0	0,483	0,158
2	15	21/12/2011	33	3,501	0,662
3	15	11/01/2012	54	6,52	1,605
4	15	11/02/2012	85	11,76	2,617
5	15	07/03/2012	110	16,04	1,972
6	15	15/03/2012	118	17,287	1,555
7	15	22/03/2012	125	19,133	2,037
8	15	29/03/2012	132	19,993	2,741
9	15	04/04/2012	138	23,327	3,294
10	15	12/04/2012	146	22,393	3,258
11	15	20/04/2012	154	22,347	2,313
12	15	27/04/2012	161	22,24	3,92

Tabla 3-9. Estadísticos de la evolución de la anchura de los ejemplares en los muestreos.

En las figs. 3-19 a 3-21 y tabs. 3-7 a 3-9, se aprecia cómo fue aumentando considerablemente el peso, longitud y anchura de los ejemplares hasta cerca del noveno muestreo, a partir del cual el crecimiento se ralentiza, lo que indica la necesidad de proceder a la recolección antes de que se manifiesten los fenómenos de epifitismo.

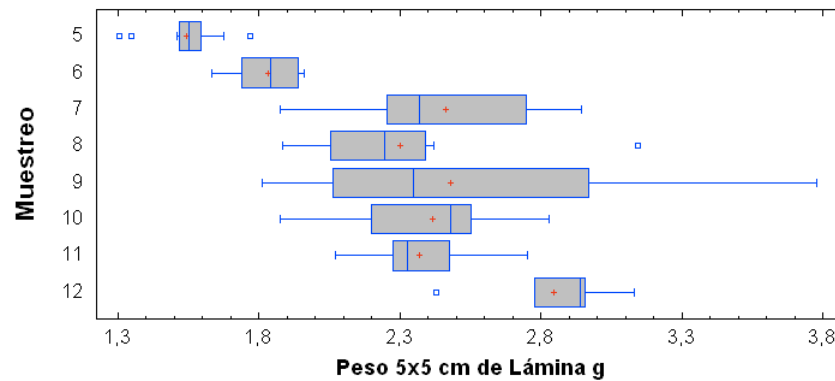


Figura 3-22. Gráfico de caja y bigotes del peso de 25 cm² de lámina de los ejemplares.

<i>Muestreo</i>	<i>n</i>	<i>fecha</i>	<i>días de inmersión</i>	<i>media</i>	<i>desv. estándar</i>
5	12	07/03/2012	110	1,543	0,125
6	7	15/03/2012	118	1,831	0,114
7	7	22/03/2012	125	2,463	0,364
8	8	29/03/2012	132	2,312	0,388
9	15	04/04/2012	138	2,48	0,571
10	10	12/04/2012	146	2,415	0,27
11	10	20/04/2012	154	2,371	0,209
12	5	27/04/2012	161	2,847	0,265

Tabla 3-10. Estadísticos de la evolución del peso de 25 cm² de lámina en los muestreos.

En la fig. 3-22 y tab. 3-10, se muestra cómo fue modificándose el peso por unidad de superficie de la lámina de *Saccharina latissima*. Esta medida se tomó a partir del quinto muestreo ya que hasta entonces la lámina no tenía apenas diferenciación tisular. Se observa un fuerte aumento de este peso hasta el séptimo muestreo en el que más o menos se estabiliza, hasta que en el último parece incrementarse significativamente, pero este aumento puede deberse a que al perderse longitud de lámina en el último muestreo por degradación apical (ver fig. 3-20), la zona seccionada de la lámina fuera posicionalmente algo más inferior que la de anteriores muestras y, por ello, más gruesa y pesada.

En cuanto a las tasas de crecimiento en peso (tab. 3-11), el máximo alcanzado fue del 12,5 % día en el segundo muestreo y a partir del cuarto esta tasa se redujo a la mitad (sobre el 6%) y más adelante a la cuarta parte (sobre un 3%), manifestando fuertes

descensos en alguno de los muestreos que, como se verá más adelante, fueron debidos a grandes fluctuaciones ambientales sufridas durante el período de cultivo.

Muestreo	intervalo	peso inicial (g)	peso final (g)	t (días)	TCR (% día)
2	18/11/11 - 21/12/11	0,005	0,307	33	12,510
3	21/12/11 - 11/01/12	0,307	3,536	21	11,636
4	11/01/12 - 11/02/12	3,536	20,978	31	5,743
5	11/02/12 - 07/03/12	20,978	48,384	25	3,343
6	07/03/12 - 15/03/12	48,384	79,122	8	6,148
7	15/03/12 - 22/03/12	79,122	120,913	7	6,058
8	22/03/12 - 29/03/12	120,913	123,799	7	0,334
9	29/03/12-04/04/12	123,799	142,644	6	2,362
10	04/04/12-12/04/12	142,644	170,5	8	2,230
11	12/04/12-20/04/12	170,5	169,733	8	0,056
12	20/04/12-27/04/12	169,733	209,666	7	3,018

Tabla 3-11. Tasas de crecimiento relativo (TCR) en peso obtenidas a lo largo de la experiencia.

Para finalizar con los parámetros biométricos a continuación (fig. 3-23), se muestran los gráficos de caja y bigotes de las biometrías realizadas de los ejemplares tomados de las 5 cuerdas muestreadas durante el día de la cosecha final (30/04/2012). Estos gráficos están realizados con los datos obtenidos de los ejemplares más pesados de cada una de las cuerdas. En la tab. 3-12, se muestran los estadísticos descriptivos de los mismos.

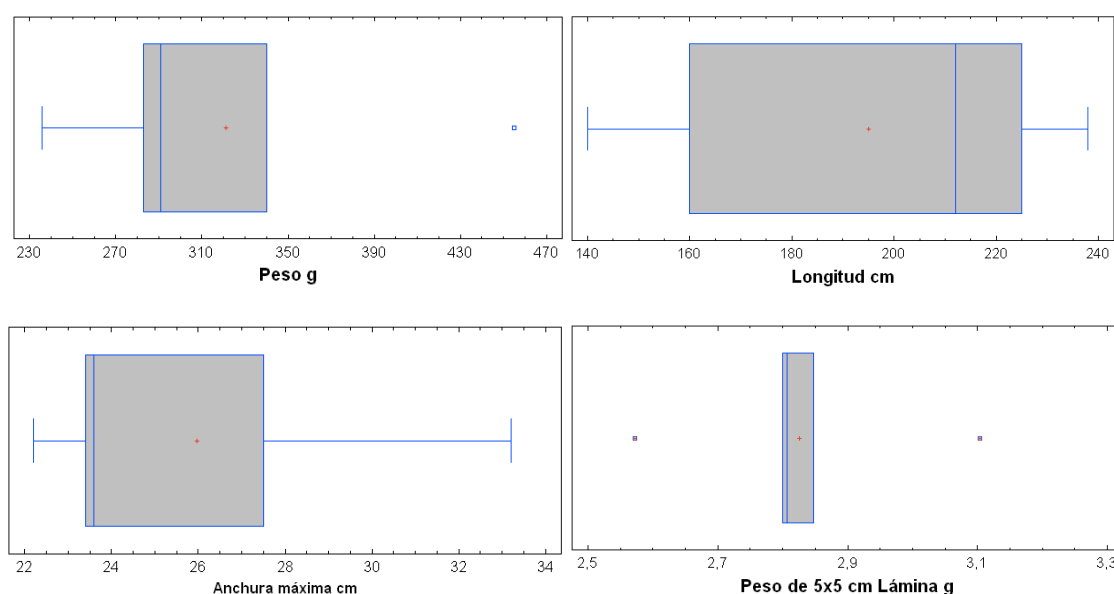


Figura 3-23. Gráficos de caja y bigotes del peso, longitud, anchura y peso de 25 cm² de lámina de los ejemplares seleccionados el día de la cosecha.

	<i>n</i>	<i>media</i>	<i>desv. estándar</i>
<i>Peso (g)</i>	5	321,0	83,495
<i>Longitud (cm)</i>	5	195,0	42,685
<i>Anchura máxima (cm)</i>	5	25,98	4,501
<i>Peso lámina (5x5 cm, g)</i>	5	2,826	0,189

Tabla 3-12. Estadísticos de los ejemplares seleccionados el día de la cosecha (30/04/2012).

3.3.2.iii.3 Producción

Los cálculos de producción final se realizaron con el peso de los implantes de 5 cuerdas seleccionadas al azar el mismo día que se procedió a la recolección del parque (30/04/2012). El peso medio total de las algas recogidas en las 5 cuerdas el día de la cosecha fue de $135,65 \pm 5,68$ kg. Como en cada cuerda hay 2 m cultivados, tendríamos 10 m en total, es decir, que en 1 m de cuerda cultivada habría $13,56 \pm 1,36$ kg.

Como entre cada cuerda cultivada hay una separación de 1 m y la distancia entre las dos líneas del “long-line” es de 1,5 m, tendremos un área de $1,5 \text{ m}^2$, que es lo que le corresponde a una de las cuerdas de cultivo. Como cada cuerda tiene 2 m cultivados a razón de $13,565 \text{ kg/m}^2$ en $1,5 \text{ m}^2$ tenemos 27,13 kg de producción, en 1 m^2 tendríamos una producción de $18,2 \text{ kg/m}^2$. La homogeneidad de la producción tanto con respecto a la posición de las cuerdas en el parque de cultivo como con la profundidad de los implantes fue estudiada mediante la realización de los gráficos y ANOVAs que se detallan en las figs. 3-24 a 3-26 y tabs. 3-13 a 3-15.

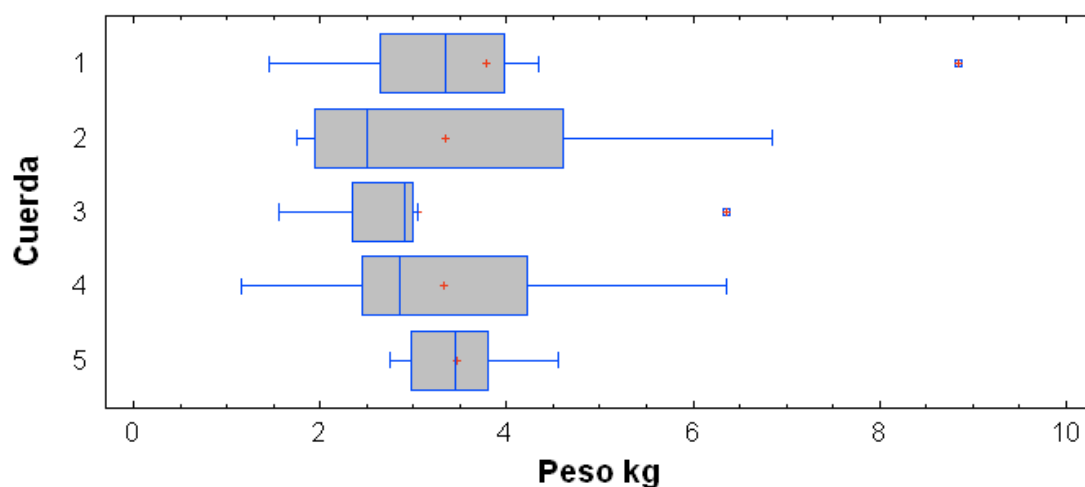


Figura 3-24. Gráfico de caja y bigotes del peso de los implantes cada 25 cm para cada cuerda de cultivo de *Saccharina latissima* muestreada al azar en el día de la cosecha (30/04/2012).

Sitio	n	media	desv. estándar	grupos homogéneos (p-valor: 0,3877)
1	8	3,781	2,223	X
2	8	3,337	1,945	X
3	8	3,052	1,432	X
4	8	3,319	1,619	X
5	8	3,469	0,606	X

Tabla 3-13. Estadísticos y ANOVA del peso de los implantes cada 25 cm para cada cuerda de cultivo de *Saccharina latissima* muestreada al azar en el día de la cosecha (30/04/2012).

Observando la fig. 3-25 y tab. 3-13, se puede apreciar que no hay diferencias significativas en el peso de los implantes en función de la posición de la cuerda en el parque de cultivo, por lo que se considera que su producción es homogénea.

En cuanto al grado de estratificación por la profundidad y su influencia en la producción en las figs. 3-25 y 3-26 y tabs. 3-14 y 3-15 se muestran los resultados del análisis entre las variables peso y longitud realizados con respecto a la posición que presentaban los implantes en las cuerdas. Para ello se dividió cada tramo de la cuerda en “v” en cuatro sectores, siendo la posición 1 la más superficial y la 4 la profunda. En cada sector se pesaron sus implantes y se realizaron las biometrías del ejemplar más pesado.

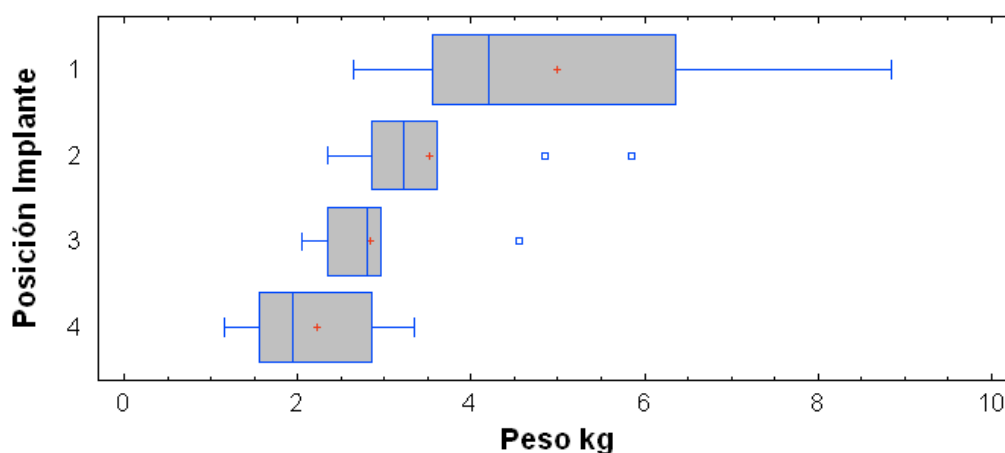


Figura 3-25. Gráfico de caja y bigotes del peso de los implantes por tramos de profundidad en las cuerdas de cultivo de *S. latissima* el día de la cosecha (30/04/2012).

Profundidad	n	media (kg)	desv. estándar	grupos homogéneos (p-valor: 0,0001)
1	10	4,995	1,98668	X
2	10	3,52	1,06489	XX
3	10	2,83	0,68443	X
4	10	2,22	0,811104	X

Tabla 3-14. Estadísticos, ANOVA y grupos homogéneos del peso de los implantes por tramos de profundidad en las cuerdas de cultivo de *S. latissima* el día de la cosecha (30/04/2012).

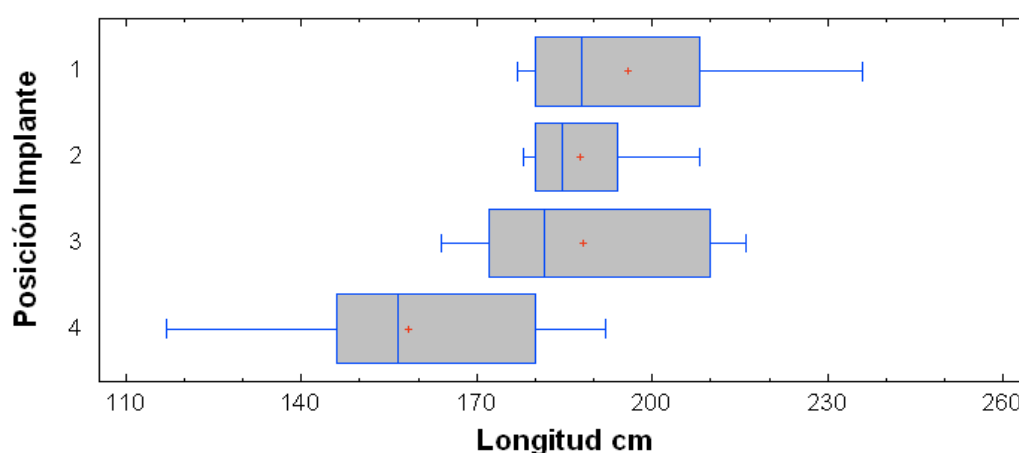


Figura 3-26. Gráfico de caja y bigotes de la longitud máxima de los ejemplares por tramos de profundidad en las cuerdas de cultivo de *S. latissima* el día de la cosecha (30/04/2012).

Profundidad	n	media (cm)	desv. estándar	grupos homogéneos (p-valor: 0,0004)
1	10	195,9	19,8352	X
2	10	187,8	10,2502	X
3	10	188,3	20,4181	X
4	10	158,4	21,8795	X

Tabla 3-15. Estadísticos, ANOVA y grupos homogéneos de la longitud máxima de los ejemplares por tramos de profundidad en las cuerdas de cultivo de *S. latissima* el día de la cosecha (30/04/2012).

Tanto en las figs. 3-25 y 3-26 como tabs. 3-14 y 3-15, se observa que tanto el peso como la longitud es mayor en la profundidad 1; es decir, en la posición más cercana a la superficie. El resultado obtenido era el de esperar, ya que en la posición más superficial es la que mayor luz incide sobre las algas y por tanto, la posición que más favorece el crecimiento. En los ANOVA realizados se aprecia que la estratificación es mayor en cuanto al peso que a la longitud máxima de los ejemplares. Aunque existen diferencias significativas, sin embargo, estas diferencias son debidas sobre todo al tramo más profundo y podrían deberse en parte a la influencia del movimiento del peso que mantiene las cuerdas en tensión.

3.3.2.iii.4 Evolución de la fertilidad y grado de epifitismo

Para comprobar el grado de maduración del cultivo, desde el 7 de marzo de 2012 hasta el 29 de abril de 2012, durante los muestreos se fue registrando la presencia o ausencia de soro de esporocistes.

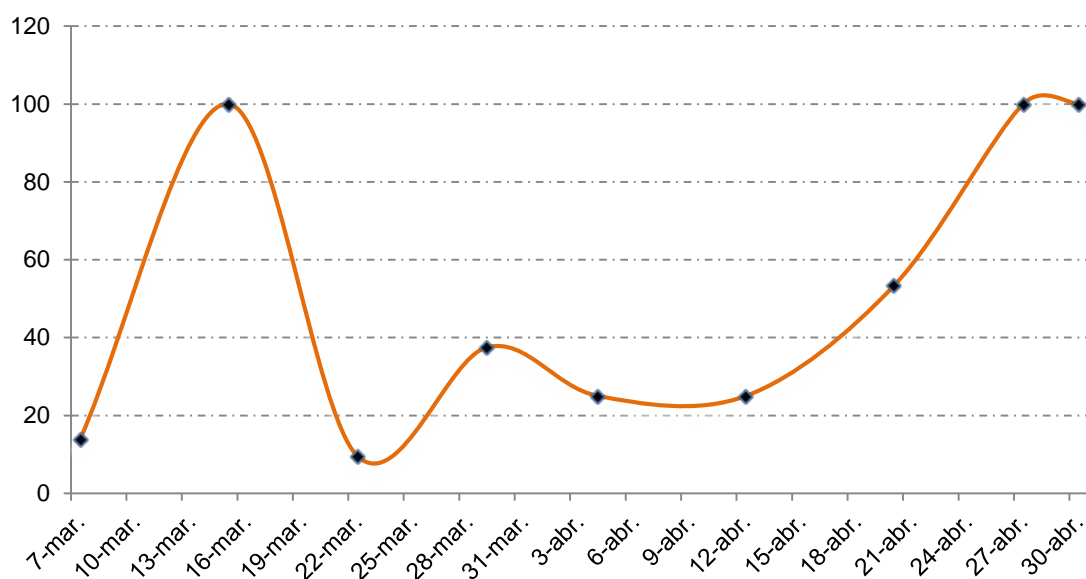


Figura 3-27. Porcentaje de individuos fértiles a lo largo del desarrollo de cultivo de *Saccharina latissima*.

Se evaluó la presencia/ausencia y, en su caso longitud y grado de maduración del soro como medida del estado de fertilidad de los esporófitos, porque este parámetro es importante puesto que puede reflejar algún tipo de estrés en el cultivo.

En la fig. 3-27, se puede apreciar que hubo una primera etapa de maduración muy fuerte y precoz entre el período comprendido entre el 7 y el 15 de marzo de 2012, en el cual prácticamente todos los ejemplares muestreados acabaron siendo fértiles. Curiosamente ese porcentaje bajó prácticamente a cero tan solo una semana después. En el período entre el 22 de marzo y el 20 de abril del 2012 la presencia de individuos con soro se mantiene en un porcentaje más o menos estable del 20-40 %, subiendo de nuevo a partir del 20 de abril de 2012 y llegando al 100% en los dos últimos muestreos.

A partir del muestreo del día 15 de marzo de 2012 se comenzó a tomar datos del grado de cobertura de los epífitos que cubrían la lámina. Para ello se midió la longitud que cubrían los epífitos en los ejemplares muestreados y se hizo el promedio de cada día de muestreo. Después se calculó el porcentaje de cobertura de los epífitos con respecto a la media de la longitud de esos ejemplares. En la fig. 3-28, se representan los resultados obtenidos.

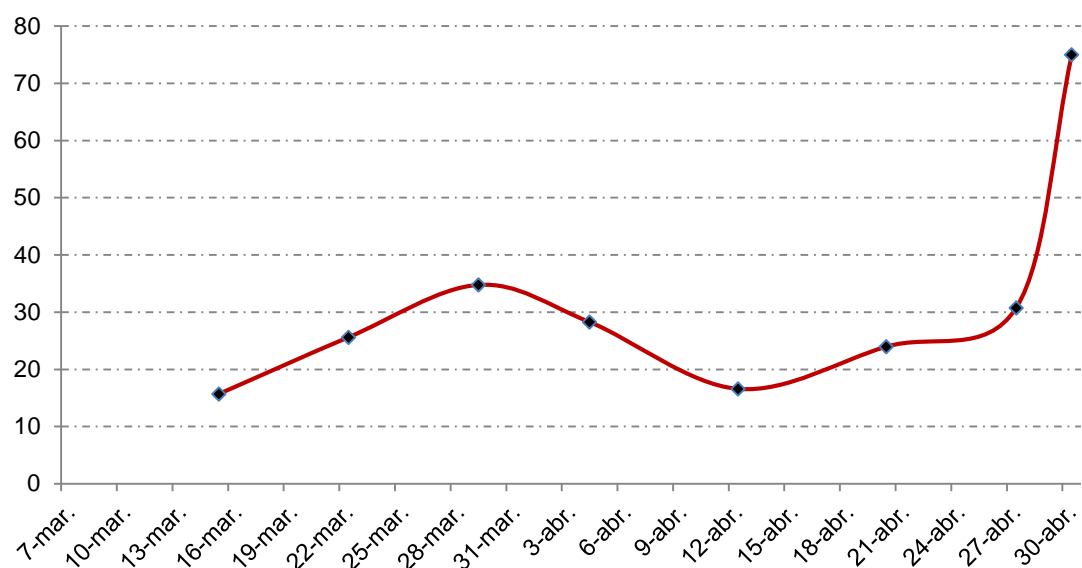


Figura 3-28. Evolución del % de lámina de *Saccharina latissima* epifitada al final del período de cultivo.

Como se puede comprobar, el grado de cobertura de epífitos fue aumentando desde el 15 de marzo de 2012 hasta alcanzar casi un 40% el 29 de marzo de 2012, momento que coincide también con uno de los picos de maduración (fig. 3-28). A partir de ese momento comenzó a bajar hasta el 12 de abril de 2012 donde empezó a incrementarse paulatinamente para hacerlo ya de una forma dramática a partir del 27 de abril de 2012 al acabarse ya el período de cultivo por las negativas condiciones ambientales principalmente de luz y temperatura del agua (figs. 3-14 y 3-17).

3.3.2.iii.5 Influencia de las condiciones ambientales en la variables biométricas

Analizando la temperatura del agua se observa que en esta temporada de cultivo el marcado ascenso térmico del agua que se registró en la semana del 22 al 29 de marzo (fig. 3-14), debido sin duda a la calma del mar, ciclo de mareas muertas (fig. 3-15), falta de nubosidad (fig. 3-17) y precipitaciones (fig. 3-16), fue uno de los factores principales del fuerte descenso de la tasa de crecimiento de *Saccharina latissima* (tab. 3-11), lo que acarreo también un aumento precoz de la cobertura de epífitos y grado de maduración (fig. 3-27 y 3-28). El subsiguiente descenso térmico por la menor insolación y el aumento de las precipitaciones hicieron que las algas volvieran a retomar el crecimiento activo presentando por ello un menor recubrimiento de epífitos y porcentaje de maduración.

En la gráfica de mareas (fig. 3-15) se puede apreciar que en las primeras quincenas de marzo y de abril se dan unos grandes rangos de marea (mareas vivas), lo cual coincide también con el aumento de la tasa de crecimiento (tab. 3-11) en ese período. Por tanto, queda de manifiesto la estrecha correlación existente entre las grandes mareas y los repuntes en la tasa de crecimiento de *Saccharina latissima*, cuestión que es fácilmente explicable por el aumento de hidrodinamismo e intercambio de nutrientes durante esos períodos.

En cuanto a la influencia de las precipitaciones se pueden apreciar en la fig. 3-16 que desde finales de diciembre de 2011 hasta principios de abril del 2012 apenas hubo lluvias. Independientemente a los valores de temperatura del agua esta etapa tan anormal de “sequía” coincide con la caída de la tasa de crecimiento (tab. 3-11), muy impropia para la época. Esta relación entre la lluvia y el crecimiento de las algas, ya conocida, se debe principalmente a que el cultivo se sitúa en una ría, por lo que las precipitaciones lavan el terreno y arrastran abundantes nutrientes con los que pueden alimentarse las algas en estas épocas durante los ciclos de marea y en la que los afloramientos oceánicos son particularmente escasos, siendo por tanto este factor muy importante en el crecimiento de *S. latissima* en cultivo.

De forma pareja actúa la insolación, que obviamente es una variable bastante correlacionada con las precipitaciones y la temperatura. En la fig. 3-17, se aprecia que en los meses de febrero y, sobre todo, en marzo hay una mayor cantidad de sol, es decir, no o apenas hubo nubosidad, y coincide con los períodos en los que la tasa de crecimiento tubo primero un aumento para después sufrir una bajada (tab. 3-11). La disminución de la tasa de crecimiento trae inmediatamente el incremento del grado de recubrimiento por epifitos. Así, los epibiontes que en otros años comienzan a aparecer a finales de primavera en esta ocasión se adelantaron al mes de marzo como muestra del estado de estrés sufrido por las algas. Ya en abril, hubo un período de mayor nubosidad y se produjo un pequeño pico en la tasa de crecimiento con una pareja disminución del grado de epifitismo.

Aunque resulta complejo valorar cuál de estos factores ambientales interrelacionados es el más importante y sus sinergismos resulta evidente que las condiciones ambientales particulares de cada año tienen una gran relevancia tanto desde el punto de vista cuantitativo como cualitativo en el cultivo industrial de *Saccharina latissima*.

3-3.2.iv. Conclusiones

Se puede concluir entonces de este experimento que el cultivo de *Saccharina latissima* en un sistema de cuerdas en “v”, presumiblemente presenta una producción mayor que un sistema de cuerda vertical, debido a que no existe tanta estratificación y las algas aprovechan mejor la luz, factor primordial en su crecimiento.

La colocación de un sistema de protección con redes se considera un método eficaz para evitar la depredación de las algas por los peces, aunque bien es cierto que durante el transcurso de este cultivo no se sufrieron fenómenos de depredación ni en la zona con protección, ni en la zona de cultivo sin protección con redes que sirvió de control.

Por otro lado queda claro que las condiciones ambientales tienen un efecto de primer orden en el desarrollo del cultivo y, por ello, cada año es muy distinto. Este año en que se ha realizado la experiencia ha sido especialmente peculiar ya que hubo un largo período de casi tres meses (enero-marzo) en el que apenas hubo precipitaciones, hubo bruscos cambios de temperatura y una fuerte insolación (figs. 3-14 a 3-17). Todo ello hizo que la tasa de crecimiento de las algas en este período fuera particularmente baja, si se compara con los datos de otras temporadas, y que por ello el fenómeno del epifitismo, uno de los principales problemas del cultivo, se adelantara mucho a lo normal, ya que su incidencia tiene mucho que ver con el estado de estrés de las algas. De todas formas el cultivo pudo recuperarse gracias a que el mes de abril fue particularmente frío y lluvioso, con lo que las algas recuperaron su vigor y pudieron producir la suficiente longitud de nueva lámina de óptima calidad comercial. Es por ello que este año el cultivo se ha extendido en el tiempo (unos 160 días), más de un mes de lo que viene siendo habitual (unos 140 días).



Figura 3-29. A la izquierda las líneas de cultivo el día de la cosecha. En el centro una de las cuerdas muestreadas el 04/04/2012 y a la derecha recolección por parte de la empresa (PORTO-MUIÑOS, S.L.) de la producción obtenida.

3-3.3. Tercera experiencia. Siembra en “v” longitudinal

3-3.3.i. Introducción

Dado que paralelamente a la experiencia anterior de cuerdas en “v” transversal protegidas con red para la depredación se observó que en otras partes del parque de cultivo sembradas con cuerdas verticales siguiendo el método tradicional no hubo depredación, por causas que más adelante se intentaran explicar, y visto que el sistema de cuerdas en “v” da unos buenos resultados productivos, en esta nueva experiencia se pretendió analizar una nueva orientación longitudinal de las cuerdas en “v” con respecto a la línea de cultivo por si esto podría suponer mejores cifras de producción a la vez que facilitaría el manejo del cultivo con respecto a la disposición en “v” transversal.

3-3.3.ii. Diseño de la experiencia

El experimento inicial pretendía comparar 6 cuerdas de cada orientación dispuestas en grupos de 3 en cada uno de los dos módulos del parque de cultivo. Debido a los inusualmente duros y reincidentes temporales del otoño-invierno de 2013-2014 las cuerdas de cultivo sufrieron muchos daños, principalmente en su parte inferior, por la acción mecánica del propio contrapeso cuya fijación, en muchos casos, se rompió haciendo que su lazo se deslizara por la cuerda erosionando los jóvenes implantes próximos a él. Este contratiempo nos obligó a reiniciar la experiencia con nuevos hilos de semilla sobrante que se habían mantenido en cultivo en suspensión en tanque en las instalaciones de la empresa ALGAFRÉS S.L. en el puerto de Sada (A Coruña). Se realizó entonces una nueva siembra el día 14/01/2014 con hilos de semilla cuyas plántulas tenían unas dimensiones de $18,5 \pm 4,9$ y $4,1 \pm 0,98$ mm de largo y ancho, respectivamente. Dado que no se dispuso de muchos implantes solo se pudieron sembrar 4 cuerdas en cada sistema (fig. 3-30), a las que se les fijó el contrapeso de manera más segura para evitar nuevos contratiempos. El cultivo se mantuvo en el mar hasta el día el 10/04/2014, un total de 86 días de cultivo. Evidentemente un período tan corto de cultivo no es válido para hacer ningún estudio cuantitativo sobre la producción final pero sí para saber en qué sistema la cosecha comercial sería mayor en el caso de que la siembra se realizara en su momento y no se sufrieran fenómenos meteorológicos tan adversos.



Figura 3-30. Aspecto de uno de los módulos de cultivo en “v” longitudinal (arriba) y transversal (abajo) al principio de la experiencia (05/12/2013). A la derecha aspecto de las cuatro cuerdas de cada sistema sembradas posteriormente en uno de los muestreos de seguimiento (19/03/2014).

Esta experiencia fue planteada para la realización únicamente de un muestreo final en el momento de la cosecha, por lo que durante el desarrollo de las algas solo se realizaron controles rutinarios de seguimiento en la medida que el mar lo permitió. El día 10/04/2014 se dio por concluida la experiencia con la recolección al azar de dos de las cuerdas de cada sistema; es decir, cuatro tramos de un metro de cultivo en cuerda transversal y otros cuatro en longitudinal. En cada metro se diferenciaron, a su vez, cuatro tramos de 25 cm correspondientes, por lo tanto, a cuatro distintas profundidades. En cada tramo se pesaron todas las algas y se realizaron las biometrías (peso, longitud y anchura) del ejemplar de mayor peso de cada tramo.

3-3.3.iii. Resultados y discusión.

3.3.3.iii.1 Variables morfológicas.

En la tab. 3-16 y en la fig.3-31, se representan los estadísticos descriptivos y los gráficos de cajas y bigotes del peso medio de los implantes y peso y longitud media de las plantas más grandes de cada uno de los tramos en que fueron divididas las dos cuerdas muestreadas en cada uno de las disposiciones:

<i>Disposición</i>	<i>cuerda</i>	<i>n</i>	<i>peso medio implantes (g)</i>	<i>desv. estándar</i>	<i>máx.</i>	<i>min.</i>
Transversal	1	4	504,25	190,31	760	314
		4	447,00	182,58	552	174
	2	4	133,50	56,15	206	74
		4	476,00	132,59	652	348
Total		16	390,19	61,72	760	74
Longitudinal	1	4	604,50	250,15	847	261
		4	495,00	107,79	647	393
	2	4	484,75	173,94	735	338
		4	532,38	179,83	796	368
Total		16	529,16	58,18	847	261
<i>Disposición</i>	<i>cuerda</i>	<i>n</i>	<i>peso máximo medio (g)</i>	<i>desv. estándar</i>	<i>máx.</i>	<i>min.</i>
Transversal	1	4	33,0	10,89	46	20
		4	38,0	5,89	44	32
	2	4	19,5	10,75	32	6
		4	31,5	5,26	36	24
Total		16	30,5	3,04	46	6
Longitudinal	1	4	42,0	6,83	49	33
		4	44,5	5,74	53	41
	2	4	38,5	4,12	44	34
		4	39,5	7,00	48	32
Total		16	41,1	1,32	53	32
<i>Disposición</i>	<i>cuerda</i>	<i>n</i>	<i>Largo máximo medio (mm)</i>	<i>desv. estándar</i>	<i>máx.</i>	<i>min.</i>
Transversal	1	4	707,50	78,05	770	600
		4	772,50	5,89	850	620
	2	4	520,00	10,75	700	260
		4	715,00	5,26	790	620
Total		16	678,75	35,46	850	260
Longitudinal	1	4	878,25	6,83	990	763
		4	835,75	5,74	860	810
	2	4	785,00	4,12	870	680
		4	752,50	7,00	790	700
Total		16	812,88	1,32	990	680

Tabla 3-16. Estadísticos descriptivos del peso de los implantes y peso y longitud de los mayores ejemplares de los cuatro tramos en los que se dividió cada uno de los dos metros muestreados en cada una de las dos cuerdas cosechadas en cada disposición el 10/04/2014.

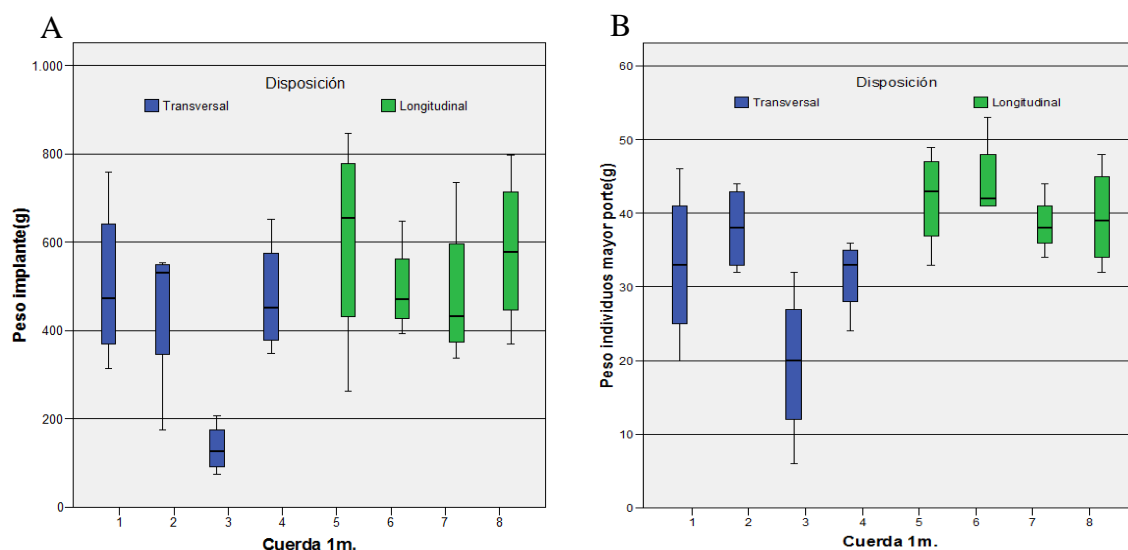


Figura 3-31. Gráficos de caja y bigotes del peso de los implantes (A) y peso medio de las plantas mayores (B) en relación a disposición transversal o longitudinal de las cuerdas de cultivo el 10/04/2014.

Se aprecia a simple vista que existen diferencias entre el peso medio de los implantes y plantas mayores de los mismos entre los dos tipos de disposiciones, siendo claramente mayores las cifras obtenidas en la disposición longitudinal frente a la transversal, el ANOVA realizado (tab. 3-17) muestra que estas diferencias son significativas tanto en el peso de los implantes como de los ejemplares.

Disposición	n	Peso medio implantes (g)	Desv. estándar	max.	min.	p-valor
Transversal	16	390,19	61,72	760	74	0,032
Longitudinal	16	529,16	58,18	847	261	
Disposición	n	Peso máximo medio (g)	Desv. estándar	max.	min.	p-valor
Transversal	16	30,5	3,04	46	6	0,001
Longitudinal	16	41,1	1,32	53	32	

Tabla 3-17. Estadísticos descriptivos y ANOVA del peso medio de los implantes y de las plantas mayores en relación a su disposición transversal o longitudinal el 10/04/2014.

3-3.3.iv. Producción

Los cálculos de producción final de la experiencia arrojarían unas cifras de 2,164 kg/m y 1.560 kg/m en disposición longitudinal y transversal, respectivamente. Estos valores de producción no son ni con mucho comparables con las cifras de producción habitual de una cosecha, evidentemente porque el período de cultivo fue tan solo de 86 días. En cuanto a la posible estratificación de la producción en la fig. 3-32 y tab. 3-18 se ofrecen los gráficos y valores obtenidos en cuanto al peso de los implantes y longitud máxima de

las plantas en las cuerdas muestreadas en función de los cuatro tramos de profundidad considerados tanto para las cuerdas transversales como longitudinales. Se aprecia que en ninguno de los sistemas existen diferencias significativas, aunque sí se nota que los valores de ambas variables disminuyen con la profundidad, sobre todo en el caso de la disposición transversal donde los p-valores son claramente inferiores. Es de suponer que si el cultivo se hubiera prolongado durante más tiempo estas diferencias hubieran llegado a serlo como en la experiencia anterior en cuerdas en “v” transversal.

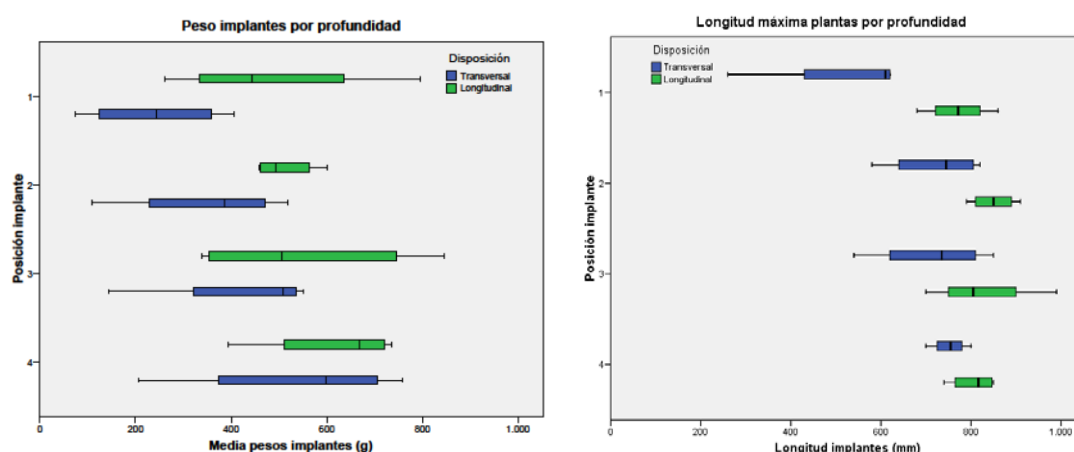


Figura 3-32. Gráficos de caja y bigotes del peso medio de los implantes y longitud media máxima de las plantas en relación a la profundidad (1-4) y a los dos tipos de disposición (transversal vs. longitudinal) de las cuerdas de cultivo el 10/04/2014.

Disposición	Profundidad	n	Peso implantes (g)	Desv. estándar	p-valor
Transversal	1	4	242	147	0,212
	2	4	349	174	
	3	4	429	191	
	4	4	540	240	
Longitudinal	1	4	485	226	0,772
	2	4	512	67	
	3	4	550	242	
	4	4	617	156	
Disposición	Profundidad	n	Longitud máxima (mm)	Desv. estándar	máx.
Transversal	1	4	525	177	0,087
	2	4	723	108	
	3	4	715	132	
	4	4	753	41	
Longitudinal	1	4	771	74	0,567
	2	4	850	52	
	3	4	825	121	
	4	4	806	51	

Tabla 3-18. Estadísticos descriptivos y ANOVA del peso de los implantes y longitud máxima media de las plantas en relación a la profundidad (1-4) y a los dos tipos de disposición (transversal vs. longitudinal) de las cuerdas de cultivo el 10/04/2014.

3-3.3.v. Conclusiones

La disposición en “v” longitudinal respecto al parque tiene mayor productividad que la transversal reflejándose en mayores cantidades de biomasa.

Los medios técnicos requeridos, tanto para la colocación como para la recolección, de las cuerdas longitudinales son menores que los usados en las transversales debido a dos principales causas: la necesidad de colocación de travesaños para mantener las cuerdas madre separadas, y la de ir amarrando las cuerdas en “v” por los dos bandos del parque, por lo que para facilitar la maniobra se necesitan 2 embarcaciones.



Figura 3-33. Una de las cuerdas en “v” longitudinal el día de la cosecha.

3-4. Discusión general y conclusiones finales

3-4.1. Producción

En Canada, Druehl *et al.* (1988) obtuvieron cosechas de *S. latissima* de 8 kg/m en sistemas en “long-line” horizontales después de 8 meses de cultivo en el mar. Más adelante en este país Chopin *et al.* (2004) en sistemas de AMTI obtuvieron valores medios de cosecha muy superiores, comprendidos entre 8,01 y 20,67 kg/m, después de 7-9 meses de cultivo en “long-lines” cercanos a jaulas de salmón. En Escocia Sanderson *et al.* (2012), también en sistemas de AMTI, obtuvieron cosechas de 12.4 kg/m tras 5 meses de cultivo de *S. latissima* en cuerdas verticales cercanas a jaulas de salmón.

Las altas cifras de cosecha ofrecidas por Chopin *et al.* (2004), aunque similares a las obtenidas en el presente trabajo en la primera experiencia “outdoor” en cuerda vertical, requirieron de prácticamente el doble de tiempo de cultivo. Además, la longitud máxima de los ejemplares cosechados por estos autores después de 278 días de cultivo fue de 160 cm, mientras que en los de la citada experiencia fue de más de 260 cm en tan solo 140 días de cultivo. Aun así la cosecha de Canadá alcanzó valores de cosecha semejantes a los aquí obtenidos gracias a una mayor densidad de siembra ya que utilizaron el sistema continuo en el que el hilo de semilla se enrolla alrededor de la cuerda de cultivo.

Debido a la temperatura del agua del mar la ventana de cultivo de *S. latissima* en el noroeste peninsular no puede exceder los 5-6 meses, entre noviembre y abril (Cremades *et al.*, 2007; Peteiro & Freire, 2009). Además, un hipotético aumento de la temperatura del mar debido al cambio climático será problemático para el futuro de este cultivo en la Península Ibérica. Pero por otro lado se debe indicar la gran capacidad de adaptación genotípica de esta especie a los cambios de temperatura (Heinrich *et al.*, 2012). Por ejemplo, en Noruega la temperatura del agua durante el desarrollo de los cultivos de *S. latissima* varía entre 4 y 13.6° C (Handå *et al.*, 2013), en Escocia entre 7 y 15° C (Sanderson *et al.*, 2012), mientras que en este estudio varió entre 11,2 y 15,7° C. (fig. 3-7).

Mientras que en otras partes del Atlántico *S. latissima* desde el punto de vista fenológico se comporta como una especie de óptimo desarrollo en primavera, en el noroeste de España lo hace como una especie de invierno, con crecimiento óptimo entre

noviembre y abril; fuera de este período el efecto sinérgico del fotoperíodo, intensidad lumínica y temperatura del agua acaba siendo letal para la especie (Heinrich *et al.* 2012). Otras experiencias han tratado de solventar esta limitación sumergiendo en verano las cuerdas de cultivo horizontal a mayor profundidad (Peteiro *et al.*, 2006), pero este proceder es técnicamente inviable y en absoluto rentable desde el punto de vista económico. Sin embargo es importante volver a destacar que en la primera experiencia de cultivo realizada en este estudio en 2009-2010 se han obtenido cosechas en tan solo 4-5 meses similares e, incluso, superiores a las obtenidas en Canadá por Chopin *et al.* (2004) después de casi el doble de tiempo de cultivo, lo que conlleva por otra parte una reducción en los costes de producción y de tiempo de ocupación del espacio. Además *S. latissima* en Galicia produce plantas de mayor tamaño que tienen mayor valor comercial evidenciado por su mayor “substantiality value” (Kawashima, 1984), un índice asiático aplicado al cultivo comercial de *Saccharina japonica* (“kombu” asiático) para el consumo humano y que tienen que ver con el grosor de la lámina (Maihr *et al.*, 1991).

3-4.2. Sistemas de conducción

El diseño de las líneas de cultivo y los sistemas de conducción ensayados en esta memoria, en líneas generales basados en el colgado de cuerdas independientes de corta longitud en líneas superficiales, además de garantizar producciones tanto cuantitativa como cualitativamente mayores que las obtenidas en sistemas de cuerdas de cultivo en horizontal, es más seguro, versátil y tienen menores costes de mantenimiento que los sistemas horizontales.

A pesar de que las condiciones ambientales en los tres ciclos de cultivo “outdoor” ensayados fueron tan marcadamente distintas que no permitieron sacar conclusiones definitivas sobre la mejora productiva que suponen las cuerdas en “v” frente a las verticales, todo parece indicar que este sistema en “v”, y en especial en la dirección de las líneas del parque, puede ser el más productivo por unidad de superficie.

La principal diferencia del diseño propuesto frente a los más habituales usados en occidente es que las cuerdas de cultivo no son un elemento estructural, por lo que su grosor y calidad no está tan condicionado. Además el sistema de líneas dobles flotantes en superficie conectadas por flotadores transversales es mucho más seguro frente a las posibles roturas accidentales de alguna de las mismas. Otra ventaja es que estas

estructuras flotantes no se colonizan mucho por el “fouling” y pueden autolimpiarse en gran medida simplemente dándoles la vuelta en superficie después de la temporada de cultivo.

Por otro lado, este sistema de *S. latissima* en cortas cuerdas verticales sembradas con el método japonés obviamente tiene mayores costes de mano de obra que la siembra continua en largas cuerdas horizontales usada en otras zonas del Atlántico norte. Sin embargo, en el noroeste de España, concretamente en Galicia, los cultivos de algas deben ser llevados a cabo por imperativo legal in las concesiones administrativas disponibles en los polígonos de cultivo de mejillón en batea. En estas concesiones, los lugares disponibles normalmente no sobrepasan cuadrículas de 2.500 m², donde los sistemas de siembra en pequeñas cuerdas verticales independientes es más versátil y se asemeja más al manejo tradicional del cultivo de mejillón en batea.

Este sistema permite un tiempo de cosecha sostenido en el tiempo lo que es muy adecuado para la venta del “kombu de azúcar” en fresco para consumo humano, destino para el que este recurso tiene el más alto valor añadido. Además el uso de pequeños segmentos de hilo de semilla (implantes), aunque de siembra más laboriosa, ahorra hilo de semilla, reduce la competencia intraespecífica y permite obtener producciones similares por metro de cuerda de cultivo a las obtenidas en siembras continuas, pero con ejemplares mayores de mayor índice de calidad y valor comercial.

3-4.3. Depredación

En las distintas experiencias realizadas ha estado siempre presentes, como sospecha o evidencia los procesos de depredación, que son debidos principalmente a peces de la familia Sparidae como la salema (*Salpa salpa*) o la boga (*Boops boops*). Estos peces depredan en otoño y principios de invierno preferentemente las plántulas jóvenes, comiendo las partes medias y apicales de las algas sin alcanzar las zonas meristemáticas. Esto coincide con los estudios que apuntan que la actividad depredadora de ambas especies se incrementa en otoño e invierno durante el periodo previo al desove (Ruitton *et al.*, 2006). Como resultado de esta depredación *S. latissima* sobrevive al ataque, pero con un sustancial retraso en su desarrollo debido a la pérdida de la mayor parte de su superficie asimiladora. Este fenómeno de depredación no existió o fue insignificante en las primeras experiencias de cultivo de *S. latissima* en Galicia que se llevan realizando

desde 2002 (Peteiro & Freire, 2012). Sin embargo, la depredación por peces se incrementa año a año y ella ha forzado a abandonar este cultivo en otras partes de la Península Ibérica (Asturias y Cantabria) donde es todavía más agresiva (E.M Llera, Centro Asturiano de Experimentación Pesquera, com. pers., mayo de 2014). Si el problema persiste serán necesarias estrategias futuras de control. De todas formas se debe indicar que al menos en las rías gallegas el problema no es más que el resultado de que la extensión del cultivo de algas es tan pequeña que poco depredador es mucho. Es de esperar que si la producción de *Saccharina latissima* se incrementa de manera sustancial los fenómenos de depredación serán proporcionalmente mucho menores.

Capítulo 4 - Optimización de la ventana de cultivo

4-1. Introducción y objetivos

Como se ha visto hasta ahora, a pesar de que los cultivos de *Saccharina latissima* en aguas gallegas son plenamente viables y altamente productivos tienen como principal limitación el estrecho período de cultivo en que pueden llevarse a cabo. Esta limitación es principalmente debida a cuestiones de temperatura del agua, que por encima de los 16-17° C suele ser limitante para su crecimiento. Por esta causa se ha llegado a la conclusión de que la mejor época de inicio de cultivo es a partir de finales de octubre y, por término general, el cultivo se puede extender hasta mediados de abril, período en que el marcado aumento del foroperíodo y de las temperaturas de las aguas origina que los talos de *Saccharina latissima* disminuyan drásticamente su tasa de crecimiento y sean rápidamente colonizados por distintas especies del “fouling” que en pocos días hacen que la biomasa obtenida hasta ese momento pierda casi en su totalidad su valor comercial, al menos para la industria alimentaria humana.

Una vía de actuación que se ha planteado para solventar este problema es el poder optimizar el período disponible de cultivo en mar iniciándolo con plantas de mayor tamaño obtenidas en cultivo controlado en tanques en tierra en lugar de con el hilo de semilla con pequeñas plántulas de pocos milímetros tradicionalmente utilizado. Estas plantas de mayor tamaño obtenidas en cultivo en suspensión en tanque evidentemente deben ser sembradas de una manera mucho más laboriosa que la tradicional japonesa con fragmentos de hilo de semilla. Se debe hacer siguiendo el método chino, sembrando cada planta una a una, enredando los rizoides en la propia cuerda de cultivo o utilizando algún método accesorio de fijación (Perez *et al.*, 1996).

Existen experiencias previas realizadas a este respecto por el equipo de investigación en el que me integro pero que no fueron realizadas de una forma muy sistemática, con plantas de muy distintas tallas y en épocas poco adecuadas, por lo que no se posee una información fiable que pudiera corroborar la hipótesis previa de aprovechar mejor el período de cultivo en mar iniciándolo con plantas de mayor tamaño. La primera experiencia previa fue realizada a principios de abril de 2009, fuera ya de la época idónea de cultivo, trasplantando el 07/04/2009 1000 plantas adultas de una longitud media de 1

m facilitadas por la Planta de Cultivo de Algas del IEO de Santander y que habían sido producidas mediante cultivo controlado en suspensión en tanques.

Para su colocación en el parque de cultivo las plantas seleccionadas se unieron de tres en tres por sus rizoides al cabo de cultivo utilizando un tipo de anillo de goma muy usado en agricultura para sujetar los sarmientos de la vid a sus tutores. En cada cuerda de cultivo se colocaron 10 de estos implantes separados unos 10-15 cm (fig. 4-1).



Figura 4-1. Trasplantes de *Saccharina latissima*. A la izquierda un ejemplo de una cuerda sembrada con estos fascículos y a la derecha detalle de su unión con gomas al cabo de cultivo.

Las cuerdas se colocaron verticalmente en una línea de cultivo vacía separadas entre ellas unos 75 cm y como es habitual con un pequeño contrapeso en su extremo para que permanecieran en tensión. Después de la siembra se realizaron 2 muestreos con intervalo aproximado de un mes que sirvieron para tomar datos biométricos de peso, longitud y anchura. En la tab. 4-1, se resumen los resultados obtenidos:

<i>Fecha</i>	<i>peso (g)</i>	<i>longitud (mm)</i>	<i>anchura (mm)</i>
07/04/2009 (inicial)	115	1120	100
06/05/2009	95	1230	240
29/05/2009 (final)	190	1420	280

Tabla 4-1. Evolución de los valores medios de peso, longitud, anchura de los ejemplares de *Saccharina latissima* de cultivo “indoor” implantados en cuerdas de cultivo.



Figura 4-2. Evolución de los trasplantes de *Saccharina latissima*. A. Aspecto de una planta representativa de las recolectadas en el primer muestreo. (06/05/2009). B y C. Partes basales de plantas del segundo muestreo (29/05/2009).

Como se puede observar en la tab. 4-1 estas plantas de casi 1m de longitud al cambiar de ambiente sufrieron algún tipo de estrés que les bloqueó el crecimiento. De hecho se observa cómo en el primer mes de muestreo apenas crecieron e, incluso, menguaron en peso, aunque de manera no estadísticamente significativa. Este bloqueo del crecimiento resulta evidente si observamos el aspecto de las plantas (fig.4-2, A), que muestran los tres cuartos superiores de su longitud (lo que corresponde a la planta original que vino de Santander) muy deteriorados (sobre todo en su ápice) y llenos de epífitos. Sólo se observa el primer cuarto basal de la planta con buen aspecto, cuarto que ha crecido ya *in situ* y por ello está saludable y es capaz de excretar el mucílago que la mantiene libre de epífitos y ramoneadores. Ya en el segundo muestreo los ejemplares se encontraban severamente epifitados, y sólo el tercio basal, el crecido *in situ*, mantenía aún un buen aspecto (fig.4-2, B y C). Aunque las algas estaban en vías de recuperación por la época en la que esto estaba ocurriendo su cultivo fue ya inviable por el fuerte aumento de la luz y la temperatura del agua, dándose por concluida esta experiencia.

Un curioso problema que se tuvo en esta experiencia fue la pérdida inesperada de muchas plantas porque las gomas utilizadas para su fijación habían sufrido algún tipo de degradación y se rompían con facilidad. Juan Manuel Salinas, el jefe de planta de IEO en Santander, ha usado este sistema durante años sin estos inconvenientes y sacamos por ello la conclusión de que en las aguas gallegas de un polígono de cultivos marinos, al haber bastante sedimentación de pseudoheces de los moluscos, se crea un ambiente anóxico a nivel de los rizoides de las plantas en el que se debe generar algún tipo de compuesto que descompone el caucho, seguramente derivado del azufre.

La conclusión final que se obtuvo de esta pequeña experiencia es que es posible el uso de estas técnicas trasplante al mar de ejemplares obtenidos en cultivo en suspensión, pero que éstos sufren un estrés de adaptación que indica que van a estar en reposo un período más o menos largo (cercano a un mes) y que la producción esperable va a depender del propio crecimiento en el mar de la nueva lámina, puesto que la de partida se perderá. Esto apunta a que quizá sea mejor emplear plantas de talla más pequeña, de producción más rápida y económica y que seguramente sufran menos estrés de adaptación por su menor diferenciación tisular; aunque siempre quedó la duda de saber qué hubiera pasado si esta experiencia se hubiera realizado en otra época del año más favorable. También se concluyó que para nuevas experiencias habría que pensar en otro tipo de material o sistema de fijación para realizar las siembras.

Un poco más adelante, en una segunda experiencia que fue el trabajo fin de máster de en acuicultura de un alumno del grupo en el que me integro (Carcajona, 2011) se pudo volver a realizar experiencias en este sentido, ya de forma más adecuada y sistemática, con el objeto de conocer el tamaño óptimo con el que se deberían trasplantar los individuos para que la producción sea lo más rentable posible. Estas experiencias se realizaron de manera secundaria al perderse por depredación de herbívoros el cultivo tradicional iniciado en 15/10/2010; por lo que la operación de trasplante no se pudo realizar hasta el 18/01/2011, es decir, con unos dos meses de retraso sobre la fecha idónea.

En esta segunda experiencia se planificó la resiembra de un número limitado de cuerdas con algas de las dos distintas tallas que se pudieron conseguir de los cultivos en suspensión tanque de la Planta de Cultivo de Algas del IEO de Santander. Las más pequeñas eran de 18 cm de longitud media, mientras que las grandes eran de 83 cm de

longitud media. Para la sujeción de las plantas esta vez se utilizaron tiras de Velcro® sujetadas con bridas a la cuerda de cultivo. Los resultados de este experimento de alguna manera, corroboraron los resultados obtenidos en la experiencia previa y volcaron algo más de luz sobre el tema. Así, al final del período de cultivo (30/03/2011, 71 días de inmersión) las plantas de un tamaño inicial de 18 cm alcanzaron un tamaño máximo medio de 122 cm y un peso máximo medio de 113 g; mientras que las plantas de 83 cm de tamaño medio inicial alcanzaron tamaños y pesos medios máximos muy similares (104 cm y 127 g, respectivamente).

Se concluyó entonces en esta segunda experiencia previa que, en el caso de realizar siembras con ejemplares juveniles en lugar de con la semilla tradicional, no compensaba hacerlo con ejemplares muy grandes porque, como ya ocurrió en la primera experiencia previa, sufrieron un fuerte estrés por el cambio de condiciones. Este estrés se manifiesta por la detención del crecimiento, una maduración precoz y una fuerte colonización por epibiontes. Hay que añadir que, además, los costes de producción de las plantas tan grandes en instalaciones en tierra son mucho mayores. Se concluyó también que si estas plantas pequeñas se hubieran introducido en octubre o noviembre, con su constante tasa de crecimiento medio alrededor del 4% día, podrían haber llegado al final del experimento a una talla y calidad comercial muy elevada, por lo que no era descartable en el futuro este modo de proceder.

Es por ello que finalmente el objetivo de la experiencia que aquí se presenta fue el seguir profundizando en la hipótesis inicial de sembrar individuos de mayor tamaño cultivados durante un tiempo en tanques en tierra. Pero en este caso se trató de ensayar estos trasplantes en época más adecuada de siembra y con un tamaño intermedio entre los dos ensayados en la última experiencia previa realizada, con el objeto de tener mayor información sobre la influencia del tamaño de planta en su desarrollo en mar. Este conocimiento permitirá planificar estrategias futuras de cultivo que permitan tanto evitar los procesos de depredación temprana como llegar a conseguir ejemplares de talla comercial antes de que la producción sufra el riesgo de perderse por el aumento de epifitismo ocasionado por la pérdida de vigor del alga al aumentar la intensidad lumínica, fotoperíodo y temperatura del agua al mediar la primavera. Este nuevo sistema tiene una serie de costes añadidos, como el tiempo de cultivo de las algas en tanques en tierra y la

mano de obra necesaria para la resiembra manual, por lo que es esencial conocer el tamaño óptimo con el que se deberían sembrar los individuos para que la producción sea lo más rentable posible.

Por otra parte al contar con una planta de producción de algas en tanques en tierra muy próxima al cultivo en mar se pudo estudiar de forma comparada el crecimiento de las plantas trasplantadas al mar y las equivalentes cultivadas en suspensión en tanques.

4-2. Material y Métodos

Las experiencias de cultivo se desarrollaron en el polígono de cultivos marinos SADA II el mismo usado en experiencias anteriores y en la Planta de Cultivo de algas en tierra que la empresa ALGAFRÉS S.L. tiene en el Puerto de Sada (fig. 4-3). Las plántulas de



Figura 4-3. Situación de las zonas de cultivo en la Ría Ares-Betanzos. ⓧ Parque de cultivo en mar de la empresa PORTO-MUIÑOS S.L. ⓧ Instalaciones de la empresa ALGAFRÉS S.L.

Saccharina latissima producidas por el método habitual en Santander fueron previamente cultivadas en suspensión en tanques cilíndricos rotomoldeados de 2000 litros en las citadas instalaciones de la empresa ALGAFRÉS S.L. en el puerto de Sada (fig. 4-4).



Figura 4-4. Tanques de la empresa ALGAFRÉS S.L. en el Puerto de Sada utilizados para el cultivo en suspensión de *Saccharina latissima*.

Al comienzo de la experiencia (16/12/2013) se seleccionaron de los cultivos en suspensión en tanque 256 plantas lo más semejantes posible y de una longitud media aproximada a 40 cm, dimensión que se estimó como la óptima a ensayar en este experimento por ser un tamaño intermedio de las plantas usadas en la experiencia anterior (el doble de las de 18 cm y la mitad de las de 83 cm). La mitad de estas plantas (128) se siguieron cultivando en uno de los tanques de ALGAFRÉS S.L. y con la otra mitad se sembraron 4 cuerdas de 2 m de longitud para su cultivo en mar. La siembra de cada cuerda se realizó disponiendo 8 grupos de 4 plantas sujetos a la misma cada 25 cm utilizando tiras de Velcro® con bridas en ambos extremos (fig. 4-5). Las cuerdas se llevaron al mar ese mismo día.

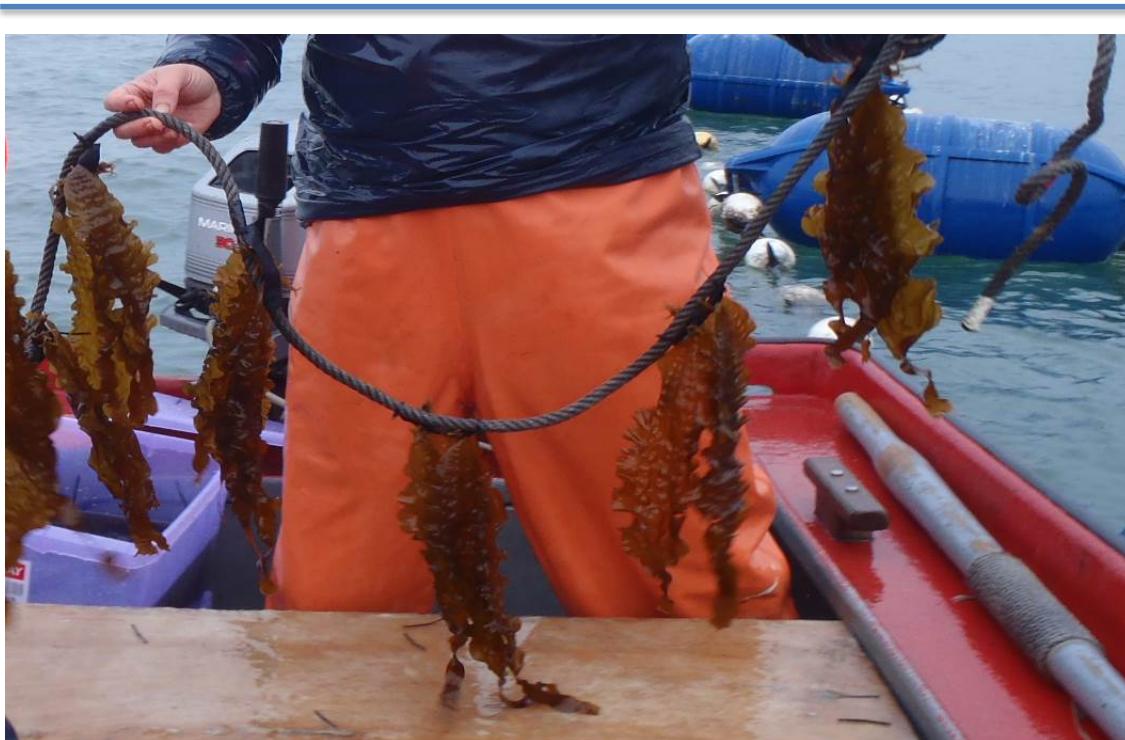


Figura 4-5. Cuerda de cultivo con grupos de 4 plantas sujetas con Velcro® antes de su introducción en el mar el 16/12/2013.

Estas cuerdas se dispusieron en “v” longitudinal en los “long-lines” superficiales del parque de cultivo en la Ría de Ares y Betanzos y se mantuvieron tensas con un contrapeso de 5 kg en su parte media (fig. 4-6).



Figura 4-6. Cuerdas de cultivo dispuestas en “v” al inicio de la experiencia (16/12/2013).

Una vez en el mar se procedió a realizar los muestreos que se indican en la tab. 4-2. En cada muestreo para realizar las biometrías se recolectaban al azar 8 de las mayores plantas del tanque de cultivo en suspensión y una cuerda del parque de la que de cada grupo de 4 plantas se seleccionaba la mayor. Lamentablemente el último muestreo en los tanques no se pudo realizar por comercializar la empresa por error los ejemplares

<i>Muestreo</i>	<i>fecha</i>	<i>días de cultivo</i>	<i>número individuos</i>
0 (Inicio)	16/12/2013	0	16 Tanque
1	13/01/2014	28	8 Tanque/8 Parque
2	18/02/2014	64	8 Tanque/8 Parque
3	06/04/2014	81	8 Tanque/8 Parque
4	10/04/2014	117	8 Parque

Tabla 4-2. Datos de los muestreos realizados.

Una vez en el laboratorio se procedió a la toma de las medidas de peso en una balanza de precisión y de la longitud individual, anchura, con un calibre y cinta métrica. También se hicieron observaciones sobre la maduración y grado de epifitismo de los ejemplares.



Figura 4-7. Grupo de 4 ejemplares trasplantados al mar en el segundo muestreo (18/02/2014).

4-3. Resultados y discusión

4-3.1. Evolución del peso, longitud y anchura de los ejemplares

A continuación se ofrecen en una serie de tabs. (4-3 a 4-7) y figs. (4-8 a 4-13), todos los datos obtenidos tras el análisis de los ejemplares de inicio y recolectados en cada muestreo.

4-3.1.i. Biometría inicial (16/12/2013)

	<i>n</i>	<i>media</i>	<i>desv. estándar</i>	<i>mínimo</i>	<i>máximo</i>
<i>Peso</i> (g)	16	7,10	0,83	6,08	8,72
<i>Largo</i> (mm)	16	357,0	26,44	325,0	420,0
<i>Ancho</i> (mm)	16	82,6	9,87	66,0	99,0

Tabla 4-3. Descriptivos estadísticos de los ejemplares iniciales.

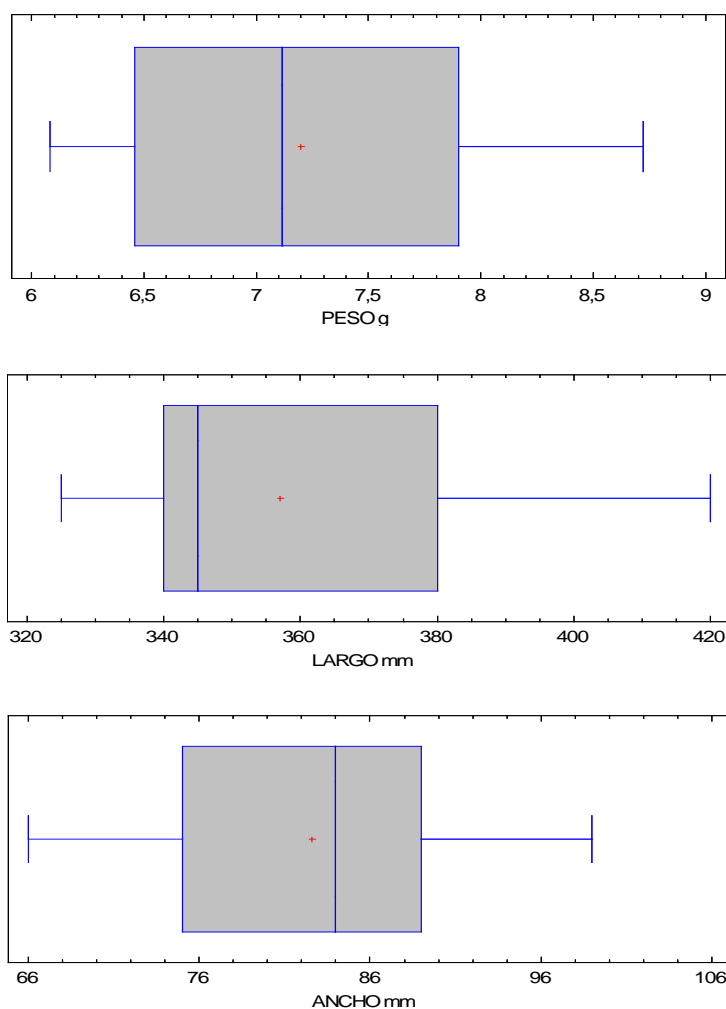


Figura 4-8. Diagramas de caja y bigotes de los datos de peso (g) y longitud (mm) y anchura (mm) de los ejemplares de *Saccharina latissima* iniciales (16/12/2013, 0 días de inmersión).

4-3.1.ii. Primer muestreo (13/01/2014, 28 días de inmersión)

Peso (g)	n	media	error est.	límite inf.	límite sup.	p-valor
Tanque	8	14,63	0,895	13,28	15,99	<0,0001
Parque	8	5,68		4,33	7,04	
Largo (mm)						
Tanque	8	530,0	16,575	504,86	555,13	<0,0001
Parque	8	254,37		229,23	279,51	
Ancho (mm)						
Tanque	8	81,87	3,319	76,84	86,90	<0,0001
Parque	8	48,75		43,71	53,78	

Tabla 4-4. Peso, largo y ancho de los ejemplares recolectados y ANOVA realizado entre los ejemplares procedentes del tanque y los del parque de cultivo en el primer muestreo.

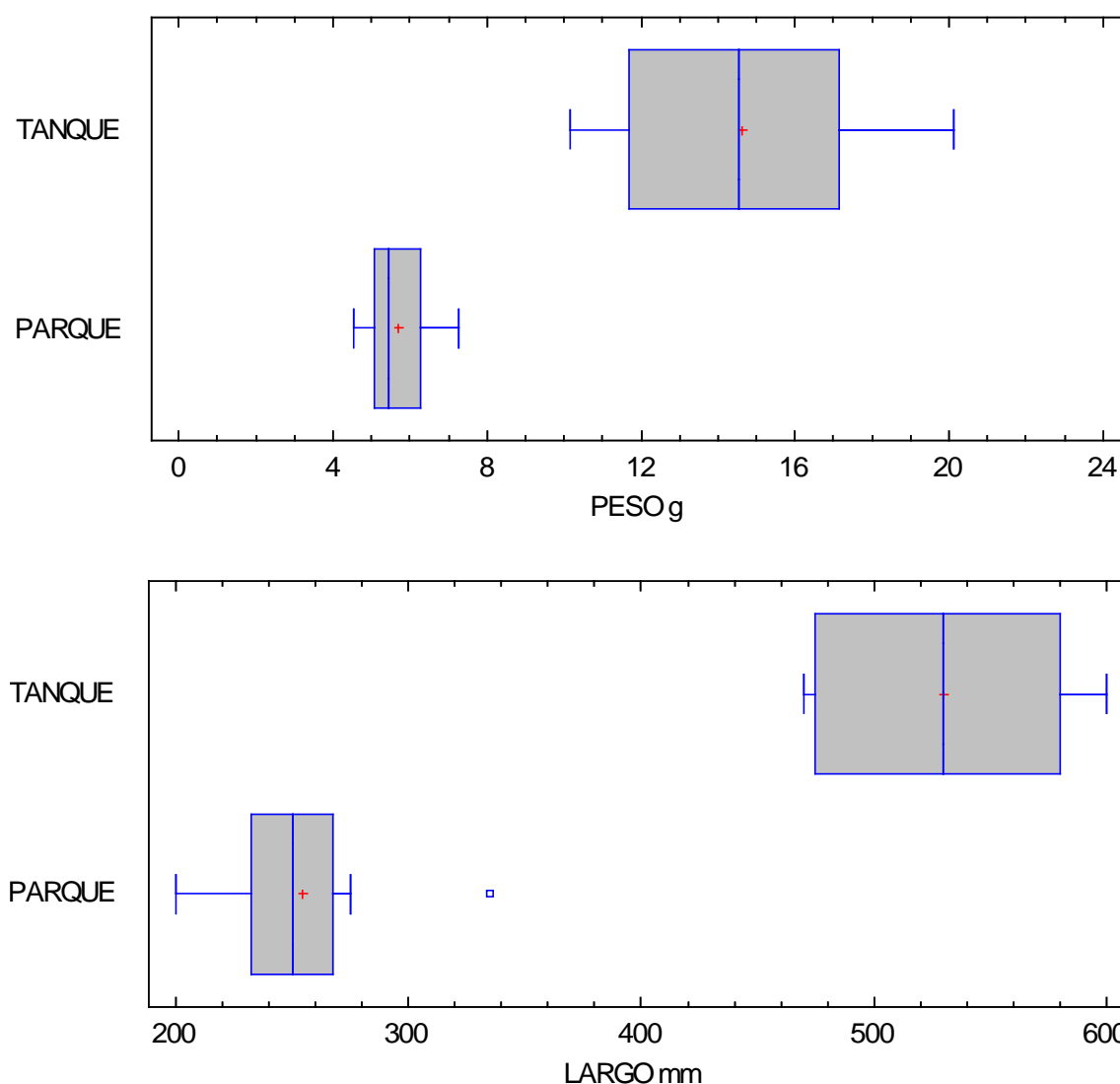


Figura 4-9. Diagramas de caja y bigotes de los datos de peso (g) y longitud (mm) de los ejemplares cultivados en tanques en tierra o en el parque de cultivo en mar.

4-3.1.iii. Segundo muestreo (18/02/2014, 64 días de inmersión)

<i>Peso</i> (g)	<i>n</i>	<i>media</i>	<i>error est.</i>	<i>límite inf.</i>	<i>límite sup.</i>	<i>p-valor</i>
Tanque	8	53,51	4,99	45,94	61,08	0,0033
Parque	8	28,57		21,00	36,14	
<i>Largo</i> (mm)						
Tanque	8	1077,5	56,59	991,66	1163,33	<0,0001
Parque	8	600,0		514,16	685,83	
<i>Ancho</i> (mm)						
Tanque	8	138,12	6,14	128,80	147,45	<0,0001
Parque	8	81,25		71,92	90,57	

Tabla 4-5. Peso, largo y ancho de los ejemplares recolectados y ANOVA realizado entre los ejemplares procedentes del tanque y los del parque de cultivo en el segundo muestreo.

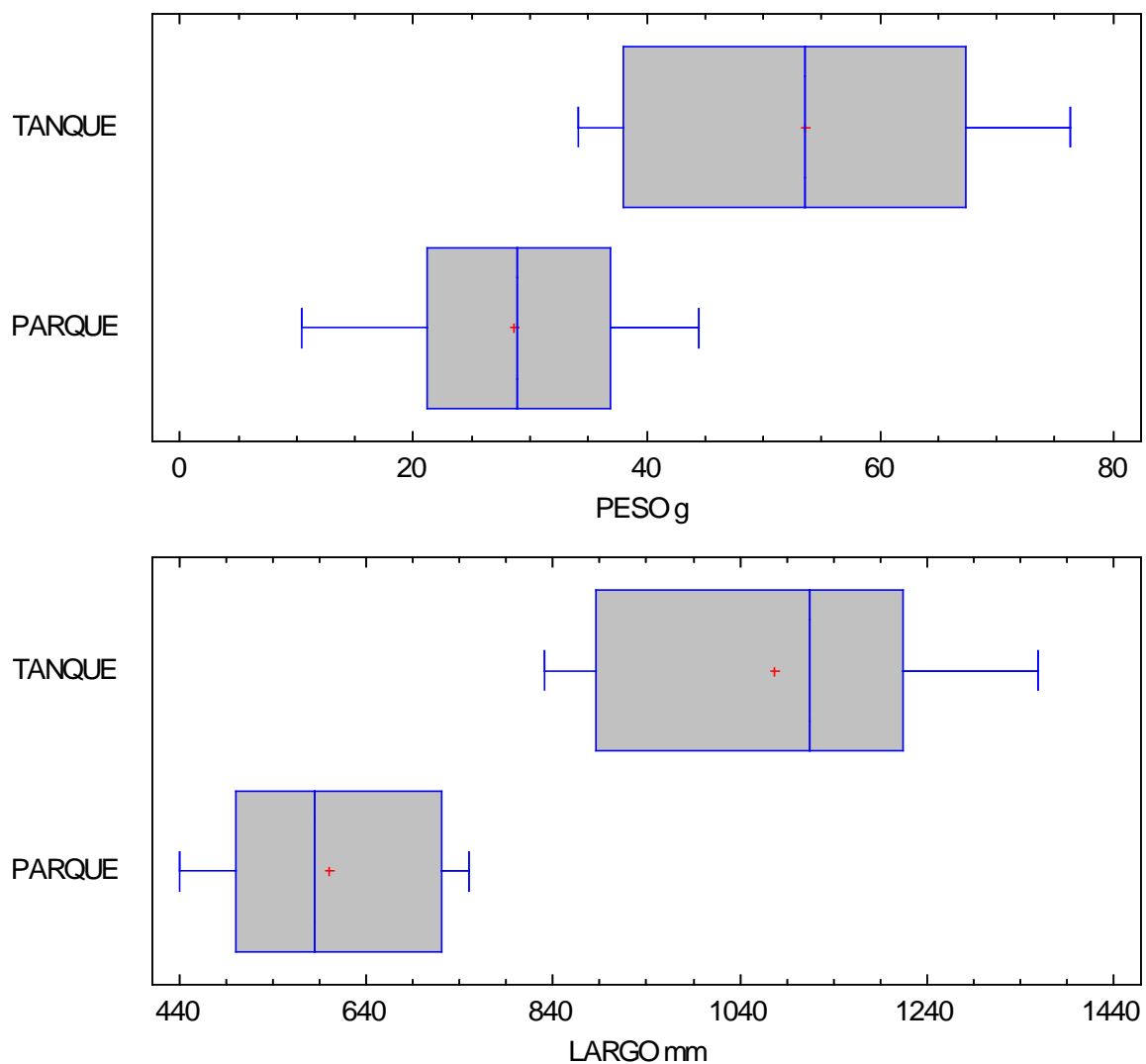


Figura 4-10. Diagramas de caja y bigotes de los datos de peso (g) y longitud (mm) de los ejemplares cultivados en tanques en tierra o en el parque de cultivo en mar.

4-3.1.iv. Tercer muestreo (06/03/2014, 81 días de inmersión)

<i>Peso</i> (g)	<i>n</i>	<i>media</i>	<i>error est.</i>	<i>límite inf.</i>	<i>límite sup.</i>	<i>p-valor</i>
Tanque	8	102,37	7,92	90,36	114,38	0,0007
Parque	8	54,02		42,01	66,03	
<i>Largo</i> (mm)						
Tanque	8	1165,0	56,64	1079,09	1250,91	0,0014
Parque	8	846,25		760,34	932,16	
<i>Ancho</i> (mm)						
Tanque	8	203,75	6,58	193,76	213,74	<0,0001
Parque	8	94,375		84,38	104,36	

Tabla 4-6. Peso, largo y ancho de los ejemplares recolectados y ANOVA realizado entre los ejemplares procedentes del tanque y los del parque de cultivo en el tercer muestreo.

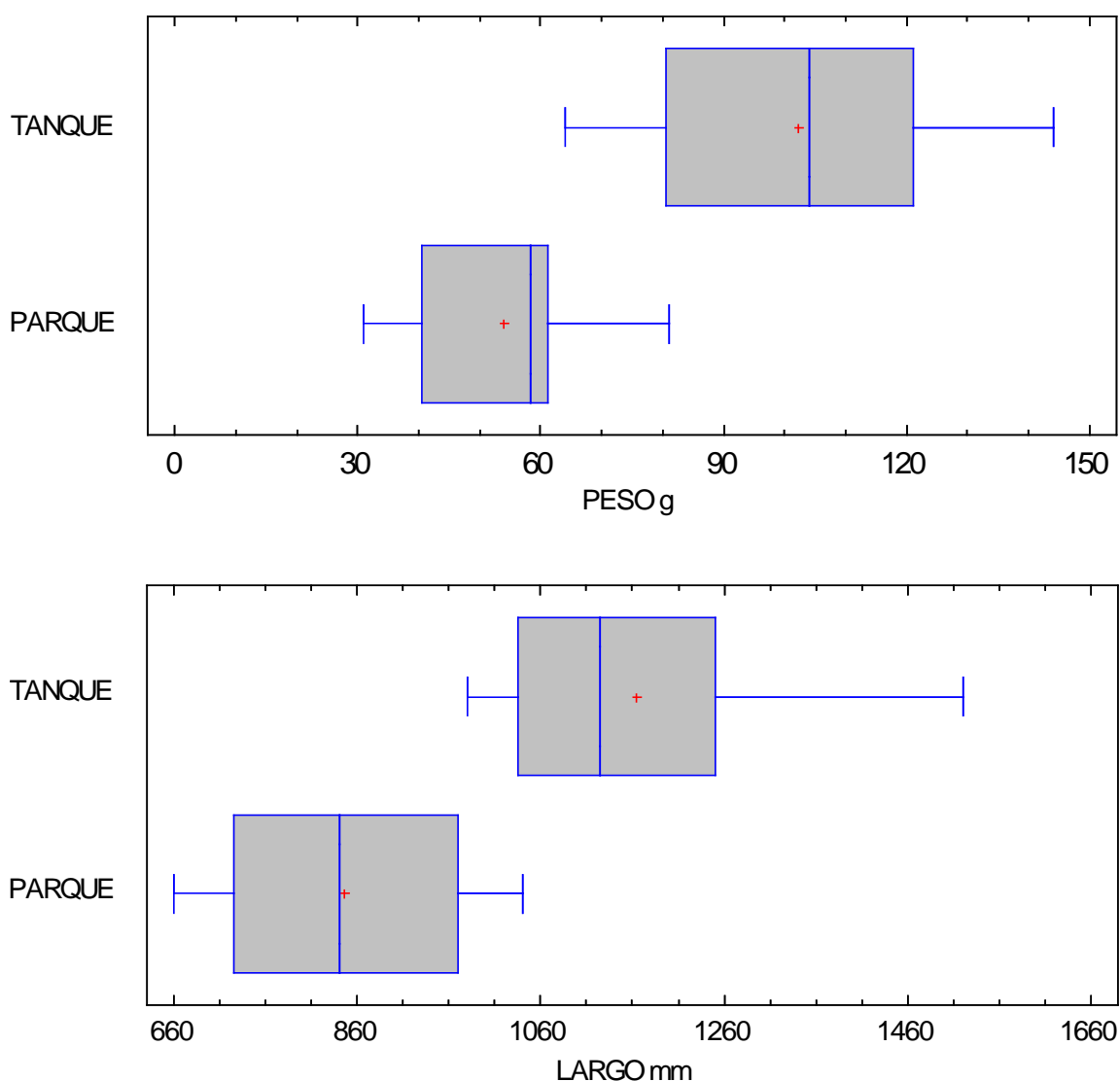


Figura 4-11. Diagramas de caja y bigotes de los datos de peso (g) y longitud (mm) de los ejemplares cultivados en tanques en tierra o en el parque de cultivo en mar.

4-3.1.v. Biometría final (Parque, 10/04/2014, 117 días de inmersión)

	<i>n</i>	<i>media</i>	<i>desv. estándar</i>	<i>mínimo</i>	<i>máximo</i>
Peso (g)	8	152,75	58,06	82,0	240,0
Largo (mm)	8	950,0	303,55	430,0	1300,0
Ancho (mm)	8	141,87	24,19	100,0	170,0

Tabla 4-7. Peso, largo y ancho de los ejemplares muestreados en el parque al final de la experiencia.

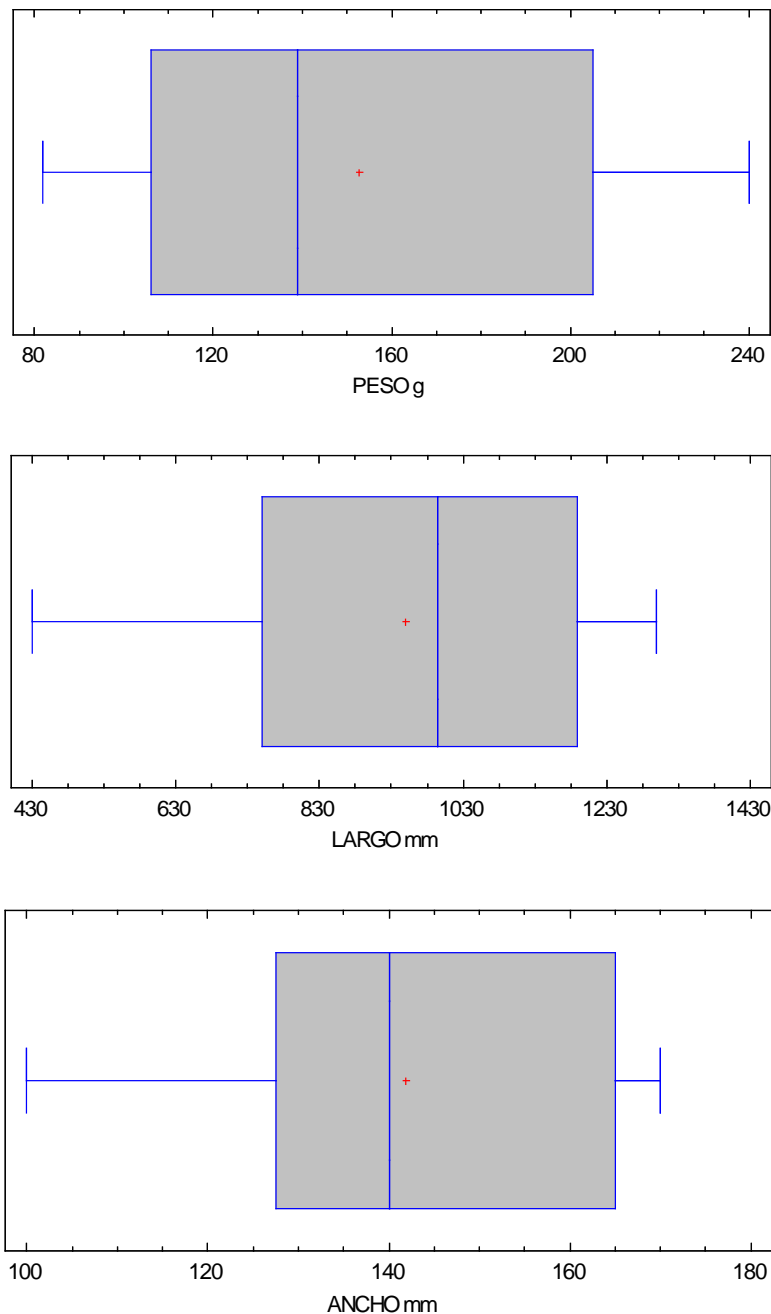


Figura 4-12. Diagramas de caja y bigotes de los datos de peso (g), longitud (mm) y anchura de los ejemplares finales recolectados en el parque. (10/04/2014, 117 días de inmersión).

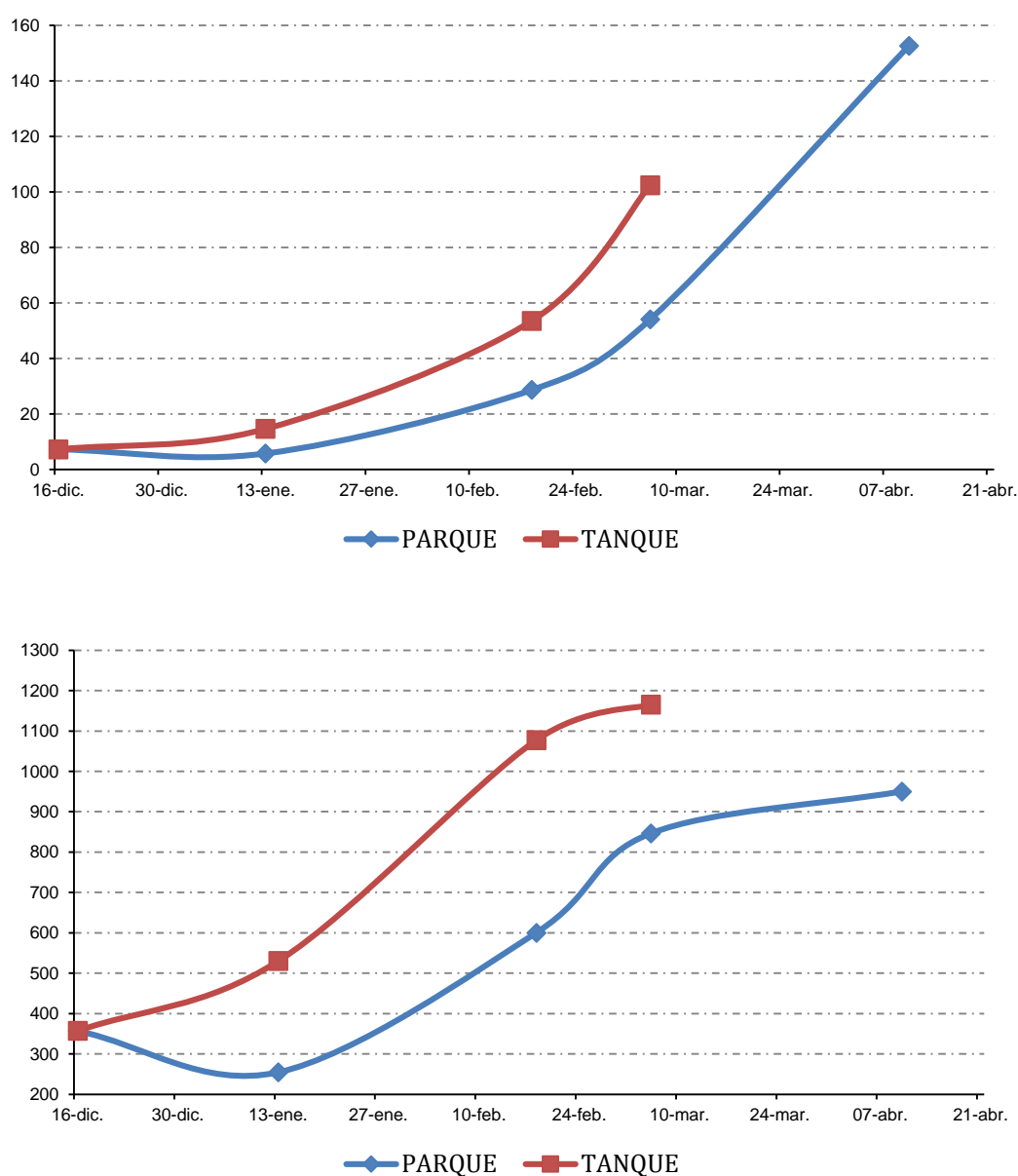


Figura 4-13. Evolución del peso medio en g (arriba) y la longitud media en mm (abajo) de los ejemplares de *S. latissima* procedentes del tanque y parque de cultivo a lo largo de la experiencia.

4-3.1.vi. Discusión

Tanto en peso como en longitud se aprecia que los ejemplares trasplantados al parque en el primer muestreo realizado a los 28 días de cultivo en mar sufrieron una paralización total del crecimiento e, incluso, una disminución en peso y, sobre todo, en longitud (tab. 4-4) si los comparamos con los datos biométricos iniciales. Es decir, que a pesar de haberse sembrado en una época favorable para su crecimiento sufrieron un fuerte y

prolongado estrés inicial por el cambio de condiciones. El mayor decrecimiento en longitud es debido sobre todo al desgarró y rotura de las partes apicales por las fuertes condiciones hidrodinámicas que padecieron en ese período.

Pasado el primer muestreo las algas del parque recuperaron ya su crecimiento, pero en ningún caso pudieron ya alcanzar a las algas cultivadas en tanque, sobre todo en longitud, esto es debido a la desventaja inicial y a que las algas en el mar, por las condiciones hidrodinámicas más estresantes, sobre todo este año, comparativamente tienden a crecer más en grosor que en longitud y anchura, de hecho, la mayor tasa de crecimiento observada en todos los muestreos es la del 4,48% en el peso de las algas del parque en el segundo muestreo (tab. 4-8).

Peso	<i>Parque</i>	<i>Tanque</i>
Primer muestreo (13-ene.)	-0,79	2,58
Segundo muestreo (18-feb.)	4,48	3,6
Tercer muestreo (06-mar)	3,7	3,8
Cuarto muestreo (10-abr.)	2,87	
Longitud	<i>Parque</i>	<i>Tanque</i>
Primer muestreo (13-ene.)	-1,2	1,4
Segundo muestreo (18-feb.)	2,38	1,9
Tercer muestreo (06-mar)	2,02	0,45
Cuarto muestreo (10-abr.)	0,32	

Tabla 4-8. Evolución de la tasa de crecimiento medio (% día) en peso y longitud en los ejemplares de *S. latissima* procedentes del parque y tanque de cultivo a lo largo de la experiencia.

Analizando las tasas de crecimiento se observa también que, en líneas generales, tras el parón inicial las obtenidas en el parque son mayores que del tanque, a pesar de que estas últimas algas, por la poca densidad de cultivo, no sufrieron en ningún caso de limitaciones de luz o nutrientes. Quizá la causa del peor crecimiento general en los tanques sean las grandes fluctuaciones de temperatura noche-día, mucho más acusadas en tierra que en el medio marino.

Aunque las plantas utilizadas en este experimento, ya plenamente diferenciadas, con láminas bastante gruesas y corrugadas, eran de la mitad de tamaño de las grandes de la experiencia anterior 2011, sufrieron un estrés casi idéntico. Sin embargo, en la experiencia del 2011, las plantas pequeñas, de la mitad de tamaño de las usadas en este trabajo y menos diferenciadas apenas sufrieron proceso de adaptación y crecieron casi desde el primer momento. Es decir, que la variable tamaño como tal no parece ser

directamente proporcional al estrés adaptativo y hay que buscar otras causas para este fenómeno.

Se debe tener en cuenta que los esporófitos de las algas pardas laminariales son de morfología muy compleja y con un alto grado de diferenciación tisular en los ejemplares adultos, lo que lleva a pensar que quizá su capacidad de adaptación a un cambio ambiental sea inversamente proporcional a este grado de diferenciación. Si esta hipótesis es cierta podría explicar por qué los ejemplares de 18 cm ensayados en la experiencia del 2011, de finas láminas apenas aún diferenciadas en córtex y médula, apenas notaron el cambio de condiciones de vida.

Recientemente ha salido publicada una investigación (Peteiro *et al.*, 2014) en la que se presentan datos de experiencias análogas a las aquí realizadas pero llevadas a cabo en Santander durante el período del 14/03/2006 a 27/06/2006. El sistema empleado para el trasplante fue el de su fijación con aros de goma idénticos a los utilizados en nuestra primera experiencia, ya que es la técnica habitual desarrollada por Juan Manuel Salinas, el jefe de la Planta de Cultivo de Algas del IEO en Santander en esa época. Las plantas trasplantadas al mar el 14-16 de marzo tenían una longitud y peso medio de 44 ± 8 cm y 22 ± 4 g, respectivamente. En la cosecha del 26-27 de junio de 2006 estos valores fueron de 120 ± 8 cm y 86 ± 6 g, respectivamente, tras 106 días de cultivo. El rango de temperatura de las aguas en el periodo de cultivo en mar fue de $13,2 \pm 2,2^\circ \text{C}$, con un intervalo de $11,1$ - $16,2^\circ \text{C}$. Estos autores solo dan datos biométricos iniciales y finales, por lo que no se sabe cómo evolucionó el cultivo y si hubo algún parón inicial o final. De todas formas con estos datos se obtiene una tasa de crecimiento relativo de 0,94% y 1,28% en longitud y peso, respectivamente, tasas de crecimiento inasumibles en un cultivo industrial, muy probablemente por un posible parón inicial análogo al que sufren las plantas grandes en Galicia y otro final debido a la temperatura del agua e insolación de las costas cantábricas en verano. En dicho trabajo se justifica la realización de la experiencia de trasplante como estrategia para evitar las pérdidas de la producción en las primeras fases de cultivo a causa de los temporales y tormentas, lluvias torrenciales o depredación, ya que sembrar más adelante para evitar estos problemas no sería lógicamente adecuado porque se acorta mucho el período de cultivo; es decir, que la hipótesis de los autores no es alargar la ventana de cultivo, sino proteger las primeras fases de la ventana habitual cultivando en

tierra los primeros meses. No se entiende entonces por qué se empieza la experiencia de trasplante ya casi en la época de la cosecha. Además la realidad deja claro que los temporales o lluvias torrenciales son impredecibles durante todo el tiempo de cultivo de esta especie en las aguas del norte y noroeste peninsular.

4-3.2. Evolución de la maduración y epifitismo

El porcentaje de maduración de los individuos fue muy diferente en ambos tipos de cultivo. Mientras las algas del tanque no mostraron ningún tipo de formación de soro los ejemplares trasplantados al mar presentaron casi en su totalidad desarrollo de soro de esporocistes ya en el segundo muestreo (18/02/2014). Queda entonces claro que una de las respuestas de las plantas al estrés por los cambios ambientales es la producción de esporas, seguramente como estrategia de supervivencia. Esta maduración precoz de esporófitos también ocurrió con las plantas de tamaño grande (tamaño inicial



Figura 4-14. Lámina gruesa de superficie muy corrugada y detalle de un soro de maduración precoz aparecido ya en los ejemplares del parque tras el segundo muestreo (18/02/2014).

de 83 cm) de la experiencia anterior realizada en 2011. Lo mismo se puede decir del grado de epifitismo. Mientras que las plantas en el tanque se mantuvieron limpias durante todo

el período de cultivo las del parque sufrieron un fuerte y precoz ataque por epibiontes, lo que es normal ya que la detención de su crecimiento y estrategias “antifouling” ligadas al mismo (como la excreción de mucílago protector) durante al menos un mes facilitó la colonización de la lámina por distintos epibiontes. Los primeros organismos en aparecer fueron algas pardas ectocarpáceas, como las especies del género *Hinckesia*, y los siguientes algas rojas de estructura sencilla. Más adelante aparecieron hidrozoos, briozoos y algunos anfípodos; progresivamente los hidrozoos y briozoos ocuparon cada vez más superficie de la lámina hasta hacerse las especies predominantes.

4-4. Conclusiones finales

Las plantas de *Saccharina latissima* cultivadas en suspensión en tanque y trasplantadas al mar con un tamaño medio de 40 cm de largo, y ya plenamente diferenciadas morfológicamente, sufrieron un estrés inicial que detuvo su crecimiento al menos un mes, a pesar de que el trasplante se hizo en una época adecuada para ello. Esta detención del crecimiento no se apreció en las plantas que continuaron su cultivo en tanque en una instalación próxima al parque de cultivo en mar.

Al parecer la variable tamaño como tal no es directamente proporcional al estrés adaptativo y muy probablemente la capacidad de adaptación a un cambio ambiental en los esporófitos de *Saccharina latissima* sea en realidad inversamente proporcional a su grado de diferenciación tisular.

Por lo tanto, en el caso de realizar siembras con ejemplares juveniles en lugar de con la semilla tradicional no compensa hacerlo con ejemplares totalmente diferenciados porque sufrirán un fuerte estrés que se manifiesta por la detención del crecimiento, una maduración precoz y una fuerte colonización por epibiontes. Hay que añadir que, además, los costes de producción de las plantas grandes en instalaciones en tierra son mucho mayores.

Capítulo 5 - Integración peces–moluscos-algas

5-1. Introducción y objetivos

En este capítulo se van a exponer las experiencias y resultados obtenidos en el estudio de la integración de los cultivos en mar abierto de *Saccharina latissima* con peces y/o moluscos. Esta integración ha sido estudiada en tres distintas experiencias realizadas además en diferentes ubicaciones y mediante el empleo de distintas combinaciones de organismos y sistemas.

El grado de integración entre cultivos se puede estimar en las algas mediante las cifras de producción, su contenido total en nitrógeno y con la relación isotópica $\delta^{15}\text{N}$. Esta última variable puede ser usada, además, para conocer el origen de las fuentes de nitrógeno utilizadas por las macroalgas (Huntington & Boyer, 2008). El contenido en proteínas en las especies de *Laminaria* y *Saccharina* ronda el 10% (Chapman & Chapman, 1980), mientras que el nivel basal de la relación isotópica $\delta^{15}\text{N}$ en macroalgas de las costas de Galicia es $5,48 \pm 1.18$ ‰ (Carballeira *et al.*, 2013), por lo que cualquier aumento significativo de estas cifras en las macroalgas cultivadas será consecuencia tanto de la integración de estos cultivos con los de peces o moluscos circundantes como de la disponibilidad de fuentes adicionales de nitrógeno de origen antrópico; en cualquiera de los casos significará que las algas, además de tener un mejor desarrollo, están haciendo un beneficio al ecosistema al disminuir la eutrofización.

Por otra parte, en el diseño de los sistemas de cultivo de macroalgas integrados con peces y/o moluscos hay dos posibles alternativas que se deben barajar: i) el diseño de *sistemas contiguos* en los que las cuerdas de algas estén muy próximas a los peces o moluscos o ii) el diseño de *sistemas en mosaico* en los que las algas estén fuera de la influencia directa de estos organismos pero que gracias a las corrientes puedan captar igualmente los nutrientes inorgánicos excretados por los mismos disueltos en el agua. Una u otra estrategia puede tener sus ventajas e inconvenientes que deben ser valorados a la hora de planificar una ordenación litoral de los sistemas de AMTI en la lámina de agua.

5-2. Metodología general de análisis elemental

En todas las experiencias se siguió la misma metodología para el análisis del contenido en nitrógeno y la relación isotópica ($\delta^{15}\text{N}$) de los distintos ejemplares de *Saccharina latissima*, variables que como se ha indicado resultan fundamentales para estimar la influencia de los cultivos de peces y/o moluscos sobre los de algas, es decir, el grado de integración entre cultivos. Para ello se utilizaron fragmentos de 5x5 cm del centro de la lámina de los distintos ejemplares muestreados. Cada fragmento fue lavado cuidadosamente con agua de mar filtrada para eliminar epífitos y sedimentos, secado a 45° C en una estufa de tiro forzado y pulverizado en un molino ultracentrífugo (Retsch ZM 100). De cada ejemplar se tomaron alícuotas de 3 mg de su polvo que fueron pesadas y empaquetadas en cápsulas de aluminio (EuroVector). El análisis isotópico fue realizado por la Unidad de Técnicas Instrumentales de Análisis (UTIA) de los Servicios de Apoyo a la Investigación (SAI) de la Universidad de A Coruña. Las muestras fueron incineradas en un analizador elemental FlashEA1112 (ThermoFinnigan) acoplado a un espectrómetro de masas de relaciones isotópicas Deltaplus (ThermoFinnigan). Como estándar de referencia para cuantificar el contenido en nitrógeno fue utilizada acetanilida. El contenido en proteínas (%) fue calculado posteriormente multiplicando el porcentaje de nitrógeno x 6.25 (MAFF, 1975).

5-3. Experiencias realizadas en sistemas contiguos

5-3.1. Cultivo de *Saccharina latissima* asociado a jaulas de peces en Esteiro, Ría de Muros y Noia (A Coruña)

5-3.1.i. Diseño de la experiencia

Esta experiencia se realizó en la concesión administrativa de carácter experimental para el desarrollo de cultivo de peces en jaulas propiedad de la empresa MARCULTURA S.A. y que se encontraba localizada en el lugar de Somorto, Esteiro, perteneciente a la ría de Muros y Noia (A Coruña) en el período comprendido entre el 20/10/2008 y el 06/04/2009. La instalación constaba de 8 jaulas flotantes cuadradas unidas unas con otras y dispuestas en línea. Las tres primeras jaulas tuvieron rodaballo en engorde durante todo el experimento, mientras que las 5 restantes estuvieron desocupadas (fig. 5-1).



Figura 5-1. Ubicación de las jaulas de cultivo de peces en el Lugar de Somorto (Esteiro, Ría de Muros y Noia, A Coruña) y detalle de las que estuvieron ocupadas con rodaballo.

Las cuerdas de cultivo de algas se pusieron en vertical en las zonas de unión entre jaulas y a ambos lados de las mismas (fig. 5-2). En total se pusieron 10 cuerdas de cultivo de 2,5m de longitud que se mantenían en tensión gracias a un pequeño muerto. La semilla de *Saccharina latissima* fue producida como en otras ocasiones en la Planta de Cultivos de Algas del IEO en Santander utilizando su banco de germoplasma. La siembra de las

cuerdas se realizó el 20/10/2008 mediante el método japonés con fragmentos de unos 5 cm de longitud que se colocaron cada 10 cm. De cada cuerda se sembró 1 m de su longitud que se dispuso en el mar a partir de 50 cm de profundidad.

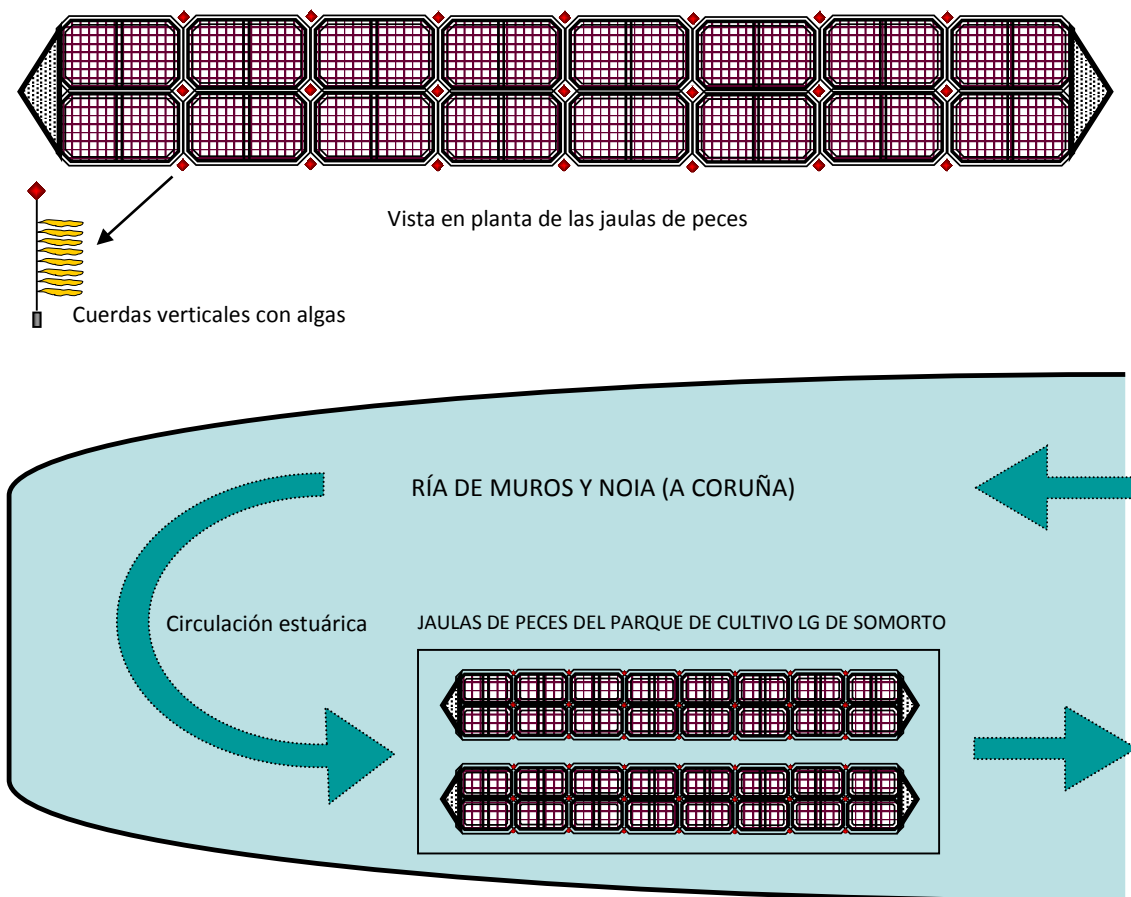


Figura 5-2. Esquema de la circulación estuárica y detalle de la línea de jaulas de cultivo empleadas en la experiencia con la ubicación de los peces y de los puntos donde se colocaron las cuerdas para el cultivo de *Saccharina latissima*.

Para seguir las variaciones de las condiciones ambientales en el transcurso de la experiencia se colocaron sensores de intensidad lumínica y temperatura que grababan lecturas cada 15 minutos. El muestreo final del cultivo de algas se realizó el 6/04/2009, transcurridos 137 días desde el inicio de la inmersión en el mar. Para la toma de muestras se recolectaron los 5 primeros implantes de cada pareja de cuerdas de los citados puntos que se pesaron individualmente. Estos pesos sirvieron para estimar la producción por metro de cultivo. Del conjunto de los implantes recolectados en cada cuerda se separaron los 10 ejemplares de mayor peso para la realización de biometrías (largo y ancho máximos de la lámina, largo del estipe, peso total escurrido, estado fenológico y grado de epifitismo) y toma de muestras para el análisis del porcentaje de N y de la relación $\delta^{15}\text{N}$.

5-3.1.ii. Resultados y discusión

Como puede observarse en la tab. 5-1 y fig. 5-3, las cifras de producción media de *Saccharina latissima* oscilaron entre los 7,1 y 10,7 kg/m, por lo que se encuentran dentro del intervalo de valores obtenidos en otras experiencias realizadas en Galicia. Son inferiores a las de 13,1 kg/m obtenidas por Cremades *et al.* (2007) utilizando también cuerdas verticales lejos de otras estructuras acuícolas, pero superiores a las de 6,2 kg/m obtenidas por Peteiro *et al.* (2006) sobre cuerdas en “long-line”.

Distancia a los peces (m)	0	6	12	24	36
Largo lámina (media \pm error est., cm)	81,9 \pm 31,4	-	113,4 \pm 17,9	122,7 \pm 20,5	124,05 \pm 19,4
Peso lámina (media \pm error est., g)	19,3 \pm 4,2	-	21,8 \pm 2,5	22,1 \pm 2,6	22 \pm 2,4
Peso implantes (media \pm error est., g)	710,1 \pm 405,8	-	721 \pm 326	989 \pm 912,3	1.071,5 \pm 858,5
Producción m ⁻¹ (kg)	7,1	7	7,2	9,9	10,7
Nitrógeno (%)	2,6	2,6	2,4	2,45	2,5
Proteínas (%)	16,25	16,25	15	15,3125	15,625
$\delta^{15}N$	6,25	5,9	5,75	5,75	5,75
Cobertura de epífitos (%)	42,3	-	43,4	42,6	41,4

Tabla 5-1. Resumen de los resultados obtenidos en el muestreo de las cuerdas de cultivo al final del experimento.

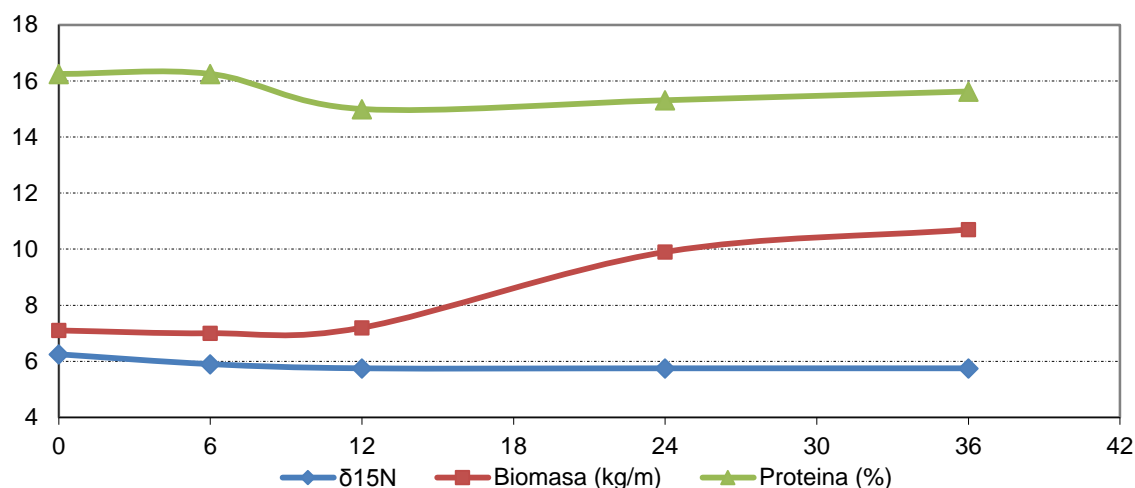


Figura 5-3. Evolución de la biomasa por metro, de la relación $\delta^{15}N$ y el porcentaje en proteínas en función de la distancia a los peces.

Aunque no existen diferencias significativas entre las cuerdas, al menos en el período y densidad de cultivo ensayado, la proximidad a los peces no resulta beneficiosa desde el punto de vista productivo, ya que las algas más próximas a ellos alcanzaron las menores tallas y cifras de producción por metro de cultivo de todo el experimento. La explicación

de este pequeño detrimento en la producción, aunque no estadísticamente significativo por la gran variabilidad de la biomasa de los distintos implantes, podría explicarse por la menor incidencia lumínica sobre estas cuerdas debido al sombreado y mayor grado de turbidez de las aguas próximas a las jaulas ocupadas por los peces frente a las de las que se encontraban vacías, ya que según (Cremades *et al.*, 2007) variaciones de este factor puede producir importantes disminuciones de la producción. Es preciso destacar que la cosecha obtenida es especialmente rica en proteínas, muy por encima de lo normal para las especies de *Laminaria*, sobre un 10% (Chapman & Chapman, 1980), y que las algas cercanas a los peces presentaron la mayor $\delta^{15}\text{N}$ (6,25); es decir, que debieron acceder en mayor medida al amonio excretado por los peces como fuente adicional de nitrógeno.



Figura 5-4. Aspecto general y detalle de una cuerda de cultivo de *Saccharina latissima* a los tres meses de la siembra (16/02/2009). A la derecha uno de los implantes de mayor desarrollo obtenidos en el muestreo final (6/04/2009).

5-3.1.iii. Conclusiones

En el caso de la integración de algas y peces, a la vista de los resultados obtenidos en esta primera experiencia, parece evidente que la causa primordial de la aparente ausencia de una ventaja neta de dicha integración deriva de que, con la densidad de cultivo de *Saccharina latissima* ensayada, durante toda su duración y en todas las zonas del mismo,

los nutrientes no debieron ser en ningún caso un factor limitante para su desarrollo. El posible beneficio de la integración de cultivos peces-macroalgas no está en relación directa a la cercanía entre ellos, que incluso puede llegar a ser un hándicap ya que la presencia cercana de los peces y de estructuras sumergidas disminuye la radiación lumínica -lo que trae como consecuencia una merma de la producción- y exacerba los procesos de sedimentación y recluta que pueden provocar un considerable aumento del “fouling”. Al parecer el cultivo de algas en las zonas de acuicultura trae como consecuencia un mayor contenido en proteínas de la cosecha obtenida.

5-3.2. Cultivo de *Saccharina latissima* asociado a jaulas de peces y bateas de moluscos en la Ría de Arousa (Pontevedra)

5-3.2.i. Introducción

La experiencia “outdoor” realizada con macroalgas en el Instituto Gallego de Formación en Acuicultura (IGaFA) consistió en el estudio de la integración del cultivo en cuerda vertical de *Saccharina latissima* tanto con el de peces en jaula como con el de moluscos en batea en la Ría de Arousa. Para ello las cuerdas con algas se dispusieron en los flotadores de la jaula de cultivo de peces y en la batea experimental de cultivo de mejillón y otros moluscos que el propio IGaFA tiene fondeadas en dicha ría. Esta experiencia se encuadra junto con otras realizadas en tierra y que serán tratadas más adelante (Capítulo 8) en la acción de investigación de la Consellería do Medio Rural e do Mar (Xunta de Galicia) denominada “Acción Multitróficos” y que se desarrolló desde marzo de 2013 hasta diciembre de 2014.

5-3.2.ii. Diseño de las experiencias

Las experiencias se realizaron en dos períodos distintos, uno del 07/03/2013 hasta el 06/06/2013 y otro del 29/11/2013 al 24/04/2014. En la primera experiencia se sembraron 8 cuerdas de 3 m de longitud y en la segunda 6 de 2,5 m, en ambas experiencias las cuerdas se sembraron con implantes de hilo de semilla de *S. latissima* producido en la Planta de Cultivo de Algas del IEO en Santander y dispuestos cada 10 cm.

La mitad de las cuerdas de cada experiencia se dispusieron en los flotadores de la jaula de cultivo de peces (besugo, *Pagellus bogaraveo*) y las otras en la batea experimental de

moluscos, a unos 100 m de la jaula. Estas cuerdas permanecieron siempre en vertical gracias a un peso de 2 kg amarrado a su extremo inferior. Al no poder disponer de ningún lugar en el mar fuera de polígono acuícola donde colocar cuerdas de cultivo de algas para usarlas como blanco de comparación con las colocadas en las inmediaciones de la jaula de peces o batea, en la primera experiencia, se mantuvieron en las instalaciones del Centro de Investigaciones Marinas (CIMA) de Corón plantas gemelas en cultivo en suspensión en tanque en régimen abierto; aunque este cultivo no servirá con fines biométricos, por sus diferentes condiciones de cultivo en cuanto a luz y temperatura, sí que puede servirnos con fines analíticos de contenido en N y de la relación $\delta^{15}\text{N}$, información clave para valorar los resultados del cultivo y su grado de integración.

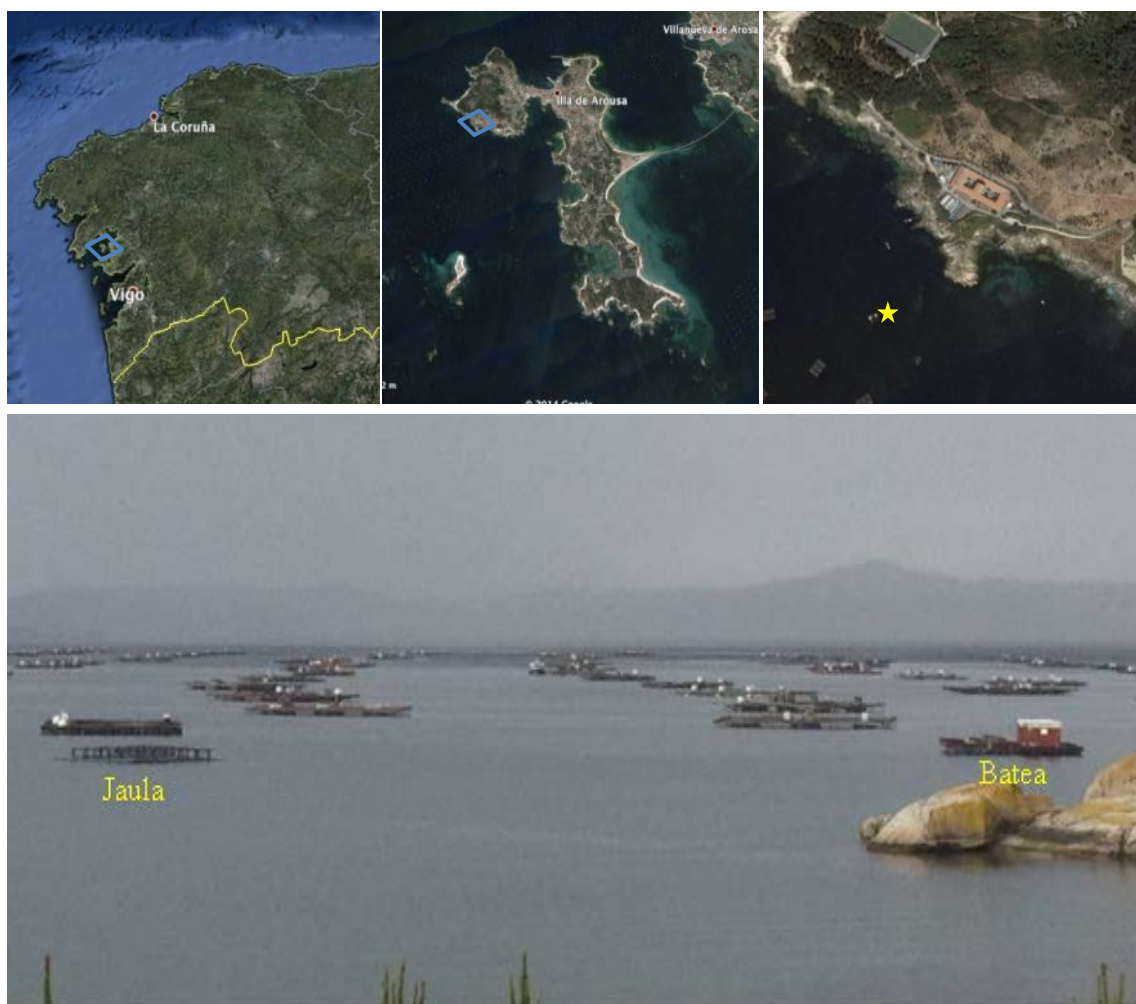


Figura 5-5. Ubicación de la jaula de peces y la batea de moluscos del IGaFA empleadas en las experiencias de cultivo de *Saccharina latissima* en la Ría de Arousa.

La segunda experiencia se realizó con objeto de corroborar la información obtenida en la primera y corregir algunas de sus deficiencias, en especial realizar el cultivo en la época adecuada (noviembre-abril) y no marzo-junio, utilizar hilo de semilla preparado con la técnica habitual, y no la de baja densidad de plantas, y colocar las cuerdas en la jaula de peces al final de una prolongación adicional de un metro de longitud para evitar en la medida de lo posible los efectos de sombreo de la propia estructura.



Figura 5-6. Colocación de una de las cuerdas sembradas con *S. latissima* en la jaula de peces y disposición de las cuerdas en la batea de moluscos en la primera experiencia (07/03/2013).



Figura 5-7. Disposición de las cuerdas de cultivo de *S. latissima* en la jaula de peces durante la segunda experiencia para evitar su sombreo e imagen submarina dos de las cuerdas de la batea en el momento de la siembra (29/11/2013).

En estas experiencias no se hicieron muestreos intermedios, sino que simplemente se siguió la evolución del cultivo hasta el momento óptimo de cosecha, momento en el que fueron retiradas las cuerdas para pasar a estudiar la biomasa, realizar, en su caso, biometrías del ejemplar más pesado recolectado en cada tramo de 25 cm de profundidad y analíticas de N y $\delta^{15}\text{N}$.

5-3.2.iii. Resultados y discusión

5.3.2.iii.1 Evolución de los parámetros ambientales

Las experiencias previas de cultivo de *Saccharina latissima* en las costas de Galicia, realizadas en los experimentos anteriores, nos indican que su período óptimo de cultivo se encuentra entre noviembre y abril, principalmente por la temperatura del agua, por lo que la primera experiencia, que por motivos intrínsecos a la aprobación oficial de la “Acción Multitróficos”, no pudo comenzar hasta marzo de 2013, no dejó de ser de tipo preliminar o preparatoria, ya que, *a priori*, contábamos con un período muy corto de cultivo. Sin embargo, como se puede observar en la fig. 5-8, la primavera del año 2013 fue inusualmente anómala y la temperatura del agua, salvo en un corto período del mes de abril, se mantuvo por debajo de los 16° C prácticamente hasta junio, lo que nos permitió alargar inesperadamente esta experiencia hasta el 06/06/2013, día en que se realizó el muestreo final.

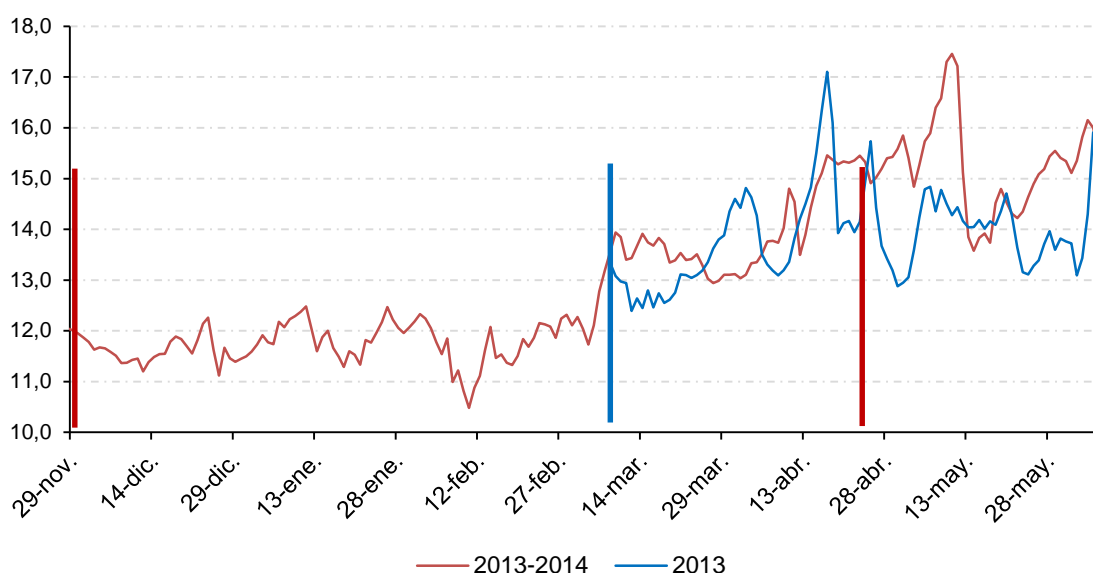


Figura 5-8. Gráfica de la evolución de la temperatura (° C) durante los dos períodos de cultivo de *S. latissima*. Entre líneas verticales azules el período en 2013 y entre líneas rojas el del 2013-2014.

5.3.2.iii.2 Evolución de la biomasa y analítica de las algas de la primera experiencia

A continuación se ofrecen en la tab. 5-2 los datos obtenidos en cuanto a la producción y composición de las algas de las distintas procedencias en esta primera experiencia.

Variable	emplazamiento		n	media \pm error est.	min.	máx.
Producción (g)	Jaula	Prof. (cm)				
		0,25	4	52,75 \pm 24,71	23	126
		0,5	4	73,5 \pm 40,95	24	196
		0,75	4	77,25 \pm 38,45	27	191
		1	4	98,5 \pm 45,75	24	232
		1,25	4	93 \pm 21,69	50	137
		1,5	4	94,25 \pm 39,82	16	204
		1,75	4	187 \pm 62,73	98	368
		2	4	173,75 \pm 56,32	90	340
		2,25	4	105,25 \pm 36,60	60	214
		2,5	4	275,5 \pm 58,92	154	437
		2,75	4	198,5 \pm 56,78	126	368
		3	4	211,25 \pm 84,94	28	409
		Total	48	136,71 \pm 15,98	16	437
		g/m	12	546,83 \pm 98,67	149	1297
Peso lámina (g)	Jaula	12	42,45 \pm 2,48	25,3	62,3	
Largo lámina (cm)	Jaula	12	73,75 \pm 1,72	65	83	
Ancho lámina (cm)	Jaula	12	21,16 \pm 0,73	15	25	
Proteínas (%)	Batea	2	11,68 \pm 0,23	11,45	11,90	
	Jaula	12	13,55 \pm 0,35	10,75	15,08	
	CIMA	2	7,34 \pm 0,44	6,90	7,77	
$\delta^{15}\text{N}$	Batea	2	5,43 \pm 0,01	5,42	5,44	
	Jaula	12	5,04 \pm 0,10	4,48	5,57	
	CIMA	2	5,5 \pm 0,0	5,50	5,50	

Tabla 5-2. Datos y estadísticos de la producción y biometrías en función de la profundidad de la cosecha de *Saccharina latissima* obtenida en la jaula de peces del IGaFA en la Ría de Arousa (06/06/2013), así como del contenido en proteínas y $\delta^{15}\text{N}$ de los ejemplares de este alga de distintas procedencias (batea de moluscos, jaula de peces e instalaciones “indoor” en el CIMA).

Los datos de producción son solo referidos a la jaula de peces porque en la batea la pérdida de planta fue muy grande por las razones que se exponen más adelante. Ya desde los primeros controles de la primera experiencia se observó que los implantes dispuestos en la jaula de peces tenían un buen desarrollo, aunque muchos de ellos tenían muy pocas plántulas y que las cuerdas colocadas en la batea las habían perdido prácticamente en su totalidad. Este fenómeno normalmente puede tener varias explicaciones, como fenómenos de depredación, exceso de luz, etc., pero quizá la más acertada en este caso

esté en relación a la calidad del hilo de semilla utilizado. Este hilo, debido a lo tarde del comienzo de la “Acción Multitróficos”, y para ganar tiempo, fue preparado de una forma distinta a la habitual, simplemente pulverizando sobre él pequeñas plántulas de *Saccharina latissima* que ya habían sido obtenidas en suspensión para realizar otras experiencias. Estas plántulas, al parecer, se fijaron más débilmente al hilo de lo que lo hacen las que se generan *in situ* cuando se pulverizan directamente sobre el hilo gametófitos maduros cargados de embriones, que es la técnica habitual. Si se introduce en el mar hilos con plántulas poco fijadas las condiciones hidrodinámicas pueden acabar literalmente limpiándolos, hecho que al parecer ocurrió en la batea mucho más que en la jaula, lo que es también lógico dado que la jaula tiene mucha menos inercia al mar de fondo que la batea. De todas formas, a pesar de que en la batea los implantes de las cuerdas se quedaron prácticamente limpios de plántulas, finalmente se desarrollaron algunos pocos ejemplares (sobre todo en profundidad) que permitieron, al menos, realizar los análisis de N y $\delta^{15}\text{N}$.

Se observa en la tab. 5-2 que la biomasa obtenida por tramos de profundidad en las cuatro cuerdas procedentes de la jaula de peces presenta una gran variabilidad entre cuerdas y la tendencia a una mayor productividad en profundidad. La explicación más plausible de esta gran variabilidad obtenida es la referida anteriormente a la heterogeneidad en el número de plántulas de los distintos implantes debida a la pérdida de muchas de ellas por estar débilmente fijadas. Por otro lado, la tendencia a la mayor productividad en profundidad, fenómeno que va en contra de lo obtenido previamente en los cultivos aislados de *Saccharina latissima*, en los que por propio autosombreo la productividad es inversamente proporcional a la profundidad, sólo puede ser explicada por la falta de luz en los primeros tramos debido al sombreado de la propia obra viva y muerta de la jaula, así como de las redes y los propios peces. También es posible que por cuestiones hidrodinámicas la pérdida de plántulas en la jaula haya sido más acusada en los primeros tramos de profundidad, como de manera más notoria ocurrió en la batea.

Dado lo tardío del experimento la producción media por metro lineal de cultivo en la jaula fue de tan solo de $546,83 \pm 98,67$ g, mientras que los ejemplares de los distintos tramos de profundidad llegaron a alcanzar un tamaño máximo medio de $73,75 \pm 1,72$ cm de largo, $21,16 \pm 0,73$ cm de ancho y un peso de $42,45 \pm 2,48$ g, siendo el máximo valor obtenido de cada una de estas variables 83 cm, 25 cm y 62,3 g, respectivamente. Todos

estos valores están muy alejados de las cifras de producción y biometrías que se obtienen cuando el cultivo de esta especie se hace en su período óptimo, que en aguas gallegas, como ya se ha tratado en capítulos anteriores, se encuentra entre octubre y mayo.



Figura 5-9. Aspecto de una de las cuerdas de cultivo en la jaula de peces y cuerda de la batea de moluscos con algunos ejemplares desarrollados en profundidad en el día de la cosecha final en la primera experiencia (06/06/2013).

El análisis del contenido en N y de la relación $\delta^{15}\text{N}$ de las muestras de *S. latissima* obtenidas tanto en la jaula de peces y batea de moluscos como de los ejemplares cultivados en suspensión en el CIMA (tab. 5-2) muestra por una parte que la $\delta^{15}\text{N}$ es bastante similar en las tres ubicaciones, por lo que en este caso no nos sirve para discriminar la posible fuente de origen del nitrógeno asimilado por *Saccharina latissima*. Este valor es, además, relativamente bajo, análogo al de las agua oceánicas, muy probablemente porque dado el período tan tardío de cultivo, el nitrógeno provenga principalmente de los fenómenos de afloramiento del comienzo del verano más de que de las agua superficiales de origen terrestre de relación isotópica más elevada. Sin embargo, sí que se aprecian significativas e importantes variaciones entre las muestras en cuanto a su porcentaje de N y, por lo tanto, su riqueza en proteínas. Es importante destacar que tanto en las inmediaciones de los peces como de los moluscos el valor en proteínas prácticamente duplica el obtenido en el cultivo en suspensión en el CIMA, valor que se considera como blanco de comparación, y que se encuentra entorno al valor de referencia

para esta especie en la literatura. Este enriquecimiento en proteínas solo es explicable por la disponibilidad para las algas de fuentes de nitrógeno excretado por peces y moluscos, lo que indica que casi la mitad del nitrógeno asimilado por las algas proviene de su cultivo integrado con estos organismos.

5.3.2.iii.3 Evolución de la biomasa y analítica de las algas de la segunda experiencia

Variable	emplazamiento	n	media \pm error est.	min.	máx.
Producción (g)	Jaula	Prof. (cm)			
		0,25	1	770	770
		0,5	1	988	988
		0,75	1	548	548
		1	1	1114	1.114
		1,25	1	1360	1.360
		1,5	1	1960	1.960
		1,75	1	648	648
		2	1	400	400
		Total	8	974	1.960
		g/m	2	3.894 \pm 474	4.368
	Batea	0,25	2	1.597 \pm 17,0	1.580
		0,5	2	1.412 \pm 288,0	1.700
		0,75	2	667 \pm 197,0	864
		1	2	839 \pm 19,0	858
		1,25	2	768 \pm 18,0	786
		1,5	2	759 \pm 91,0	850
		1,75	2	634 \pm 10,0	644
		2	2	455 \pm 21,0	476
		2,25	2	319 \pm 15,0	334
		Total	18	827,8 \pm 100,1	1.700
		g/m	4	3.565,5 \pm 549,72	4.570
Peso lámina (g)	Batea	9	68,28 \pm 4,02	50,77	84,71
	Jaula	8	87,5 \pm 15,65	27,18	135,3
Largo lámina (cm)	Batea	9	103,56 \pm 4,08	90	120
	Jaula	8	102,75 \pm 12,69	50	150
Ancho lámina (cm)	Batea	9	16,33 \pm 0,83	12	20
	Jaula	8	17 \pm 1,56	10	21
Proteínas (%)	Batea	6	10,32 \pm 0,21	9,38	10,63
	Jaula	6	9,06 \pm 0,21	8,75	10,00
$\delta^{15}\text{N}$	Batea	6	6,42 \pm 0,07	6,20	6,60
	Jaula	6	6,67 \pm 0,23	6,20	7,70

Tabla 5-3. Datos y estadísticos de la producción y biometrías en función de la profundidad de la cosecha de *Saccharina latissima* obtenida en la jaula de peces y batea de moluscos del IGaFA en la Ría de Arousa (24/04/2014), así como del contenido en proteínas y $\delta^{15}\text{N}$ de los ejemplares de este alga de ambas procedencias.

Los fuertes temporales sufridos en el invierno de 2013-2014 hicieron que en la jaula de peces solo permaneciera una cuerda sin alterar hasta el final de la experiencia, ya que otra de ellas se perdió por rotura y la tercera sufrió grandes pérdidas de producción por roce con uno de los cabos de fondeo de la propia batea al romperse. En la batea de mejillón también se perdió una de las cuerdas. Como se puede observar en la tab. 5-3, las cifras medias de producción por cuerda fueron muy semejantes entre la cuerda más o menos intacta procedente de la jaula de peces y las dos de la batea de mejillón, pero dieron una producción media de aproximadamente 3,5-4 kg/m, valores muy por debajo de las producciones normales de este cultivo en períodos de tiempo análogos pero en otras ubicaciones y en sistemas montados lejos de otras estructuras acuícolas (Peteiro *et al.*, 2006; Cremades *et al.*, 2007; experiencias del capítulo 3 de esta memoria) e, incluso, en la experiencia de integración con peces en la ría de Muros tratada anteriormente.



Figura 5-10. Aspecto de la cuerda de cultivo de la jaula de peces (izquierda) y de una de las cuerdas procedentes de la batea de moluscos en el día de la cosecha final en la segunda experiencia (24/04/2014).

Las dimensiones medias de los ejemplares mayores de cada profundidad de la cuerda de la jaula fueron de $102,75 \pm 12,69$ cm de largo por $17 \pm 1,56$ cm de ancho y un peso de $87,5 \pm 15,65$ g, siendo el máximo de estas variables 150 cm, 21 cm y 135,3 g,

respectivamente; mientras que en la batea fueron de $103,56 \pm 4,08$ cm de largo, $16,33 \pm 0,83$ cm de ancho y un peso de $68,28 \pm 4,02$ g, siendo el máximo de estas variables 120 cm, 20 cm y 84,71 g, respectivamente. Nuevamente se aprecia una estratificación vertical de la producción en la jaula de peces que solo es achacable al propio sombreado de la estructura de la jaula y la red de los peces, ya que curiosamente se obtuvo la mayor producción entre 1-1,5 m de profundidad. Sin embargo en la batea, como era de esperar, la máxima producción se obtuvo en el tramo superficial.

El análisis del contenido en N y de la relación $\delta^{15}\text{N}$ de las muestras de *S. latissima* obtenidas tanto en la jaula de peces como en la batea de moluscos (tab. 5-3) muestra por una parte que la $\delta^{15}\text{N}$ es bastante similar en las dos ubicaciones y algo más elevada que la obtenida en la experiencia del año pasado, lo cual es hasta cierto punto lógico ya que el período de cultivo es muy distinto. En la experiencia pasada la recolección fue casi en verano, cuando dominan los nutrientes de afloramiento (Fraga, 1967), con relación isotópica baja; mientras que en esta experiencia la cosecha se realizó en primavera temprana después de un largo período de desarrollo invernal con mayor proporción de aguas de origen terrestre (de Castro *et al.*, 2000), con relación isotópica más elevada.

Como en la primera experiencia las algas recolectadas tanto en la jaula como en la batea tienen unos valores de proteínas relativamente altos, del orden del 9-10%, por encima del 8% que se considera como valor de referencia. En esta ocasión el enriquecimiento en proteínas es menor quizá por el fuerte estrés de las condiciones de cultivo sufridas por las algas este año que llevaron a cifras de producción mucho más bajas de lo habitual.

5-3.2.iv. Conclusiones

La principal conclusión que podemos extraer de estas experiencias realizada con *Saccharina latissima*, cultivada en jaulas de peces o bateas de moluscos es que su integración es muy positiva sobre todo por su enriquecimiento en proteínas, lo que además de suponer una depuración real y activa del agua en formas de nitrógeno excretadas por los peces y moluscos, aumenta su valor comercial como alga alimentaria. Sin embargo, y como ocurrió en la experiencia previa de cultivo en jaulas de peces llevada a cabo en Esteiro (ría de Muros y Noia, A Coruña), las pérdidas de intensidad lumínica debidas a las propias estructuras de estas jaulas o de las bateas de moluscos restan productividad al sistema.

5-4. Experiencias realizadas en sistemas en mosaico

En este apartado se analizan los resultados obtenidos de la analítica elemental en las distintas experiencias de cultivo de *Saccharina latissima* en “long-line” en la Ría de Ares y Betanzos y que ya fueron desarrolladas desde el punto de vista productivo en el Capítulo 3 de optimización de los sistemas de conducción. En estos sistemas, denominados en mosaico, los cultivos de *Saccharina latissima*, aunque por imperativo legal se encuentran en un polígono junto con otros cultivos marinos, guardan cierta distancia con ellos.

5-4.1. Cultivo de *Saccharina latissima* en parques asociados a bateas de mejillón y jaulas de peces en la Ría de Ares y Betanzos

5-4.1.i. Resultados y discusión.

Período	variable	fecha	n	media± error est.	min.	max.
2009-10	Proteínas (%)	05/02/2010	5	18.25±0.24	17.6	19.1
		10/03/2010	5	17.78±0.19	17.2	18.4
		17/04/2010	5	14.28±0.38	13.4	15.5
		Total	15	16,77±0,50	13,4	19,13
	$\delta^{15}N$	05/02/2010	5	8,4±0,10	8,1	8,7
		10/03/2010	5	7,72±0,08	7,5	7,9
		17/04/2010	5	7,64±0,17	7	8
		Total	15	7,92±0,11	7	8,7

Tabla 5-4. Valores de la $\delta^{15}N$ y % proteínas de *S. latissima* en el cultivo 2009-2010.

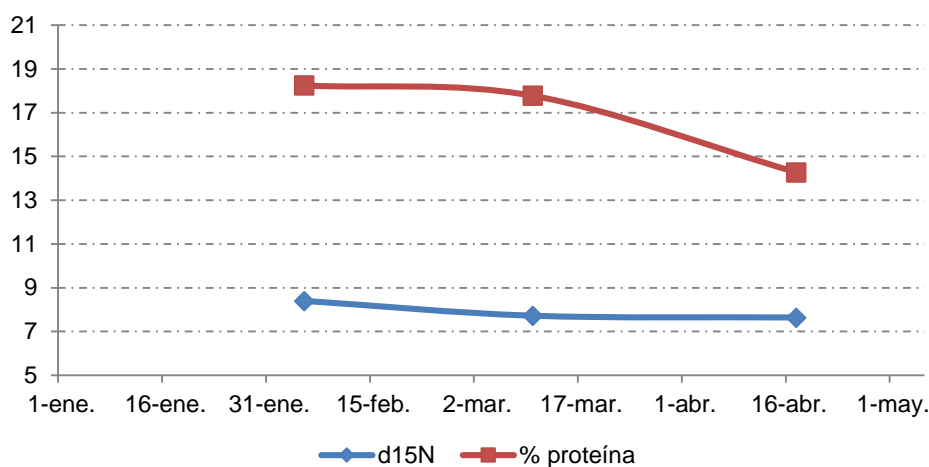


Figura 5-11. Evolución de la $\delta^{15}N$ y % proteínas de *S. latissima* en el cultivo de 2009-2010.

Período	variable	fecha	n	media± error est.	min.	max.
2011-12	Proteínas (%)	11/01/12	1	15,53	15,53	15,53
		11/02/12	1	16,13	16,13	16,13
		07/03/12	1	12,63	12,63	12,63
		15/03/12	1	14,37	14,37	14,37
		22/03/12	1	18,87	18,87	18,87
		29/03/12	1	16,70	16,70	16,70
		04/04/12	1	17,75	17,75	17,75
		12/04/12	1	17,16	17,16	17,16
		20/04/12	1	18,66	18,66	18,66
		27/04/12	1	14,21	14,21	14,21
		30/04/12	1	14,29	14,29	14,29
		Total	11	16,03±0,61	12,63	18,87
	$\delta^{15}N$	11/01/12	1	10,06	10,06	10,06
		11/02/12	1	9,20	9,20	9,20
		07/03/12	1	8,31	8,31	8,31
		15/03/12	1	8,22	8,22	8,22
		22/03/12	1	7,79	7,79	7,79
		29/03/12	1	8,09	8,09	8,09
		04/04/12	1	7,83	7,83	7,83
		12/04/12	1	7,48	7,48	7,48
		20/04/12	1	7,49	7,49	7,49
		27/04/12	1	7,02	7,02	7,02
		30/04/12	1	6,96	6,96	6,96
		Total	11	8,04±0,28	6,96	10,06

Tabla 5-5. Valores de la $\delta^{15}N$ y % proteínas de *S. latissima* en el período de cultivo 2009-2010.

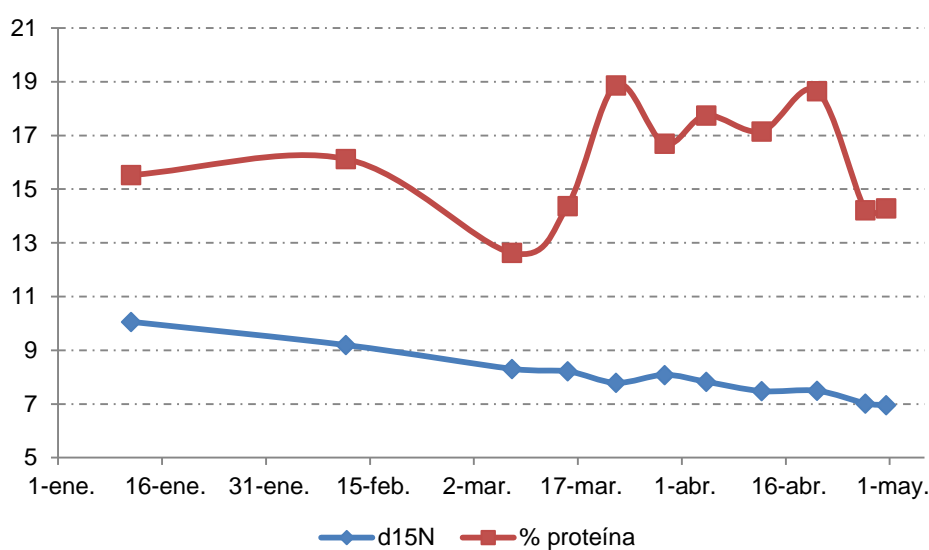


Figura 5-12. Evolución de la $\delta^{15}N$ y % proteínas de *S. latissima* en el cultivo de 2011-2012.

Período	variable	fecha	n	media± error est.	min.	max.
2013-14	Proteínas (%)	13/01/2014	1	20,00	20,00	20,00
		18/02/2014	1	20,00	20,00	20,00
		06/03/2014	1	18,13	18,13	18,13
		19/03/2014	1	18,75	18,75	18,75
		03/04/2014	1	14,38	14,38	14,38
		21/04/2014	1	13,75	13,75	13,75
		Total	6	17,5±1,13	13,75	20,00
	$\delta^{15}N$	13/01/2014	1	9,40	9,40	9,40
		18/02/2014	1	9,10	9,10	9,10
		06/03/2014	1	7,50	7,50	7,50
		19/03/2014	1	8,00	8,00	8,00
		03/04/2014	1	7,30	7,30	7,30
		21/04/2014	1	7,20	7,20	7,20
		Total	6	8,08±0,39	7,20	9,40

Tabla 5-6. Valores de la $\delta^{15}N$ y % proteínas de *S. latissima* en el período de cultivo 2013-14.

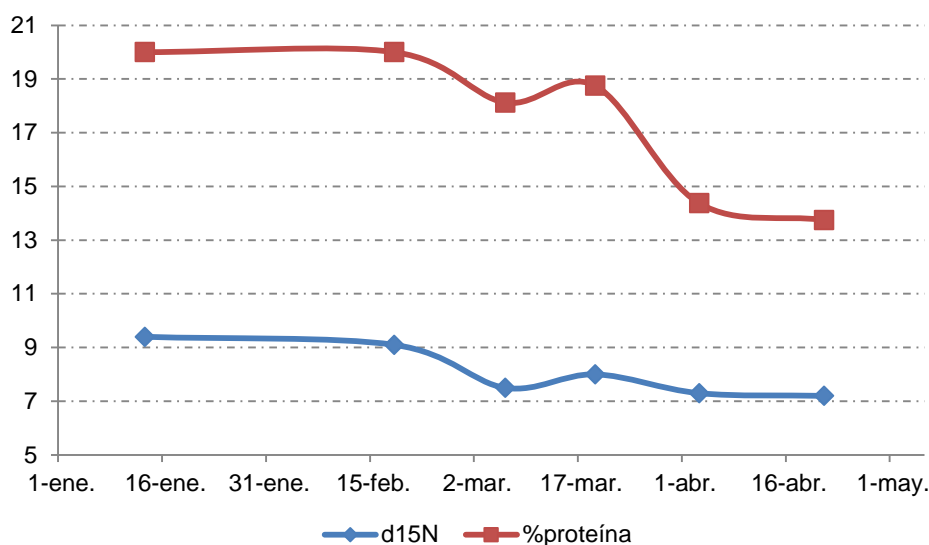


Figura 5-13. Evolución de la $\delta^{15}N$ y % proteínas de *S. latissima* en el cultivo de 2013-2014.

Como datos para el estudio de la integración de los cultivos de moluscos con algas, en las tablas 5-4 a 5-6 y figs. 5-12 a 5-14 se resumen los resultados relativos al contenido en proteínas y relación $\delta^{15}N$ de los ejemplares de *S. latissima* recolectados durante los distintos muestreos realizados en diferentes temporadas de cultivo en el polígono de cultivos marinos Sada II de la Ría de Ares y Betanzos. Actualmente en este polígono hay

cerca de 30 bateas de mejillón y la producción anual de cada una está estimada entre 33-48 t de mejillón (Pérez-Camacho *et al.*, 1991). Los mejillones producen una gran cantidad de detritos que Cabanas *et al.* (1979) estiman en aproximadamente 190 kg en peso seco por batea y día, de los cuales 31,6 kg es materia orgánica; 14,3 kg de C orgánico y 1,7 kg de N orgánico. Por ello se asume que las aguas que rodean al cultivo de *Saccharina latissima* están enriquecidas con residuos orgánicos e inorgánicos de la actividad metabólica de estos organismos.

Los altos valores en proteínas observados en los ejemplares cultivados de *Saccharina latissima* durante los tres diferentes períodos de cultivo, solo pueden ser explicados por una serie de eventos consecutivos que resultan del fenómeno de su integración con moluscos: i) el amonio constituye el principal producto del catabolismo de aminoácidos y proteínas en *Mytilus* (Bayne *et al.*, 1976), ii) ha sido señalada una asimilación linear y pasiva de amonio en un amplio rango de concentraciones en otras laminariales como *Macrocystis pyrifera* (Haines & Wheeler, 1978), *Laminaria groenlandica* (Harrison *et al.*, 1986), en la propia *Saccharina latissima* y en *Nereocystis luetkeana* (Ahn *et al.*, 1998), iii) el amonio asimilado por las algas, dada su toxicidad, es inmediatamente neutralizado mediante la formación de glutamina (Mifflin & Lea, 1976), que se transforma en ácido glutámico por una segunda reacción (Syrett, 1981), y iv) por reacciones de transaminación se pueden formar, a partir del ácido glutámico, otros aminoácidos que finalmente formarán parte de distintas proteínas (Lobban & Harrison, 1994).

Por otra parte los valores de la $\delta^{15}\text{N}$ es similar en todas las experiencias realizadas a los obtenidos por Carballeira *et al.* (2011) en otras especies de algas procedentes de áreas afectadas por la eutrofización por efluentes de plantas de cultivo de peces en tierra. En nuestra área de estudio puede ser debido a la influencia de los cultivos de besugo (*Pagellus bogaraveo*) en jaulas flotantes en un polígono contiguo y/o a la presencia de un moderado grado de eutrofización de origen antrópico.

Como se puede observar en las tablas y figuras anteriores el contenido en proteínas en los tres períodos de cultivo ensayados tiene en líneas generales tendencia a disminuir al acercarnos al momento de la cosecha, quizá este fenómeno sea un reflejo de las variaciones en la densidad o más probablemente de la actividad biológica de los mejillones circundantes que pueden perder hasta cerca del 74% de su biomasa en el

período de desove que suele estar comprendido en la zona entre los meses de marzo-abril y julio-agosto (Pérez Camacho *et al.*, 1991).

Experiencias de AMTI similares a las que aquí se han presentado, pero en las proximidades de jaulas de cultivo de salmón aportan cosechas de *S. latissima* mayores que las obtenidas en zonas alejadas de ellas. Estas cosechas se incrementan desde un 26% en experiencias realizadas en Escocia (Sanderson *et al.*, 2012) hasta el 46% en experiencias realizadas en Canadá (Chopin *et al.*, 2004). Mientras que estos últimos autores no hacen mención de ningún cambio en el contenido en nitrógeno de las algas, Sanderson *et al.* (2012) y Handå *et al.* (2013), respectivamente, señalan que *S. latissima* cultivada cerca de las jaulas de peces tiene una media de 1,9% y 2,2% nitrógeno en comparación con el 1,23% y 1,5% que presenta en los sitios de referencia.

En la presente investigación no se han podido realizar experiencias concretas similares para evaluar los beneficios de la integración en términos de cosecha. Sin embargo, dada la clara influencia de la misma en el contenido en proteínas de las algas, parece muy probable que, en alguna medida, los altos valores de producción obtenidos en nuestras experiencias (ver Capítulo 3-4), sean otra consecuencia de la integración a través del incremento en la disponibilidad por parte de las algas de carbono inorgánico procedente del enriquecimiento en CO₂ del agua a causa de la respiración de los moluscos.

5-5. Conclusiones finales

De las distintas experiencias realizadas de la integración de los cultivos “outdoor” de *Saccharina latissima* con los de peces y moluscos podemos concluir que en todos los casos se observa un mayor contenido proteico en las algas debido sin duda a la mayor asimilación de formas de nitrógeno procedentes del metabolismo de estos organismos.

El aumento en líneas generales de la relación $\delta^{15}\text{N}$ de las algas co-cultivadas con estos organismos indica que ellas están retirando del medio formas de nitrógeno que de una u otra forma tiene origen antrópico, lo que demuestra los beneficios ambientales de estos cultivos.

Desde el punto de vista productivo no se han podido realizar experiencias concretas para evaluar los beneficios de la integración. Sin embargo, dado el aumento en el contenido proteico de las algas co-cultivadas es probable que los valores de producción también se vean mejorados por el enriquecimiento del medio en carbono inorgánico

procedente de la respiración de los peces y moluscos. El beneficio de estos policultivos debe ser evaluado tanto por la mejora de la calidad del medio marino como por el aumento y diversificación de la producción acuícola total.

Tras las diferentes experiencias de integración realizadas se obtiene también la importante conclusión de que, en las rías gallegas al menos, es preferible el desarrollo de sistemas de acuicultura multitrófica peces-moluscos-algas en mosaico frente a sistemas contiguos, lo que tiene importantes implicaciones a la hora de la futura ordenación litoral de la producción acuícola. En cualquier sistema integrado las algas utilizan en alguna medida los nutrientes inorgánicos disueltos resultado del metabolismo de los organismos de niveles tróficos superiores, pero a diferencia de la integración de niveles que comparten material particulado sedimentable, en el caso de las algas la distancia no tienen por qué ser limitante, es más, incluso una excesiva cercanía como se ha demostrado es negativa para los cultivos de algas por la depleción de la dosis lumínica debida a la sombra producida por las estructuras de cultivo de peces y moluscos, los procesos de turbidez, el aumento de sedimentos finos sobre las láminas de las algas y, muy importante, la mayor densidad de diásporas de distintos epibiontes procedentes de estos cultivos que actúan como verdaderos arrecifes artificiales para multitud de organismos oportunistas.

Esta integración en mosaico tiene además la ventaja añadida de que se puede buscar para las algas la mejor ubicación en cuanto a las condiciones ambientales que requieren (en particular la hidrodinámica), solo teniendo en cuenta que las corrientes marinas se encarguen de poner a su disposición los nutrientes disueltos procedentes de otros cultivos. Además esta disposición en mosaico no condiciona ni la proporción de unos y otros cultivos ni sus técnicas de manejo.

Capítulo 6 - Conclusiones generales “outdoor”

Desde el punto de vista productivo debido a las condiciones ambientales la ventana de cultivo de *S. latissima* en el noroeste peninsular no puede exceder los 5-6 meses, entre noviembre y abril. Sin embargo se han obtenido cosechas en este estudio en tan solo 4-5 meses similares e, incluso, superiores a las obtenidas en otras partes del Atlántico norte después de casi el doble de tiempo de cultivo. Además *S. latissima* en Galicia produce plantas de mayor tamaño que tienen mayor valor comercial

Mientras que en otras partes del Atlántico *S. latissima* desde el punto de vista fenológico se comporta como una especie de óptimo desarrollo en primavera, en el noroeste de España lo hace como una especie de invierno, con crecimiento óptimo entre noviembre y abril.

El diseño de las líneas de cultivo y los sistemas de conducción ensayados en esta memoria, en líneas generales basados en el colgado de cuerdas independientes de corta longitud en líneas superficiales, además de garantizar producciones tanto cuantitativa como cualitativamente mayores que las obtenidas en sistemas de cuerdas de cultivo en horizontal, es más seguro, versátil, tiene menores costes de mantenimiento que los sistemas horizontales y se asemeja más al manejo tradicional del cultivo de mejillón en batea. Todo parece indicar que este sistema en “v”, y en especial en la dirección de las líneas del parque, puede ser el más productivo por unidad de superficie.

En el caso de realizar siembras con ejemplares juveniles en lugar de con la semilla tradicional con la idea de ampliar la ventana de cultivo de esta especie en nuestras aguas no compensa hacerlo con ejemplares totalmente diferenciados porque sufrirán un fuerte estrés que se manifiesta por la detención del crecimiento, una maduración precoz y una fuerte colonización por epibiontes.

La integración de los cultivos “outdoor” de *Saccharina latissima* con peces y moluscos acarrea al menos un mayor contenido proteico en las algas debido sin duda a la mayor asimilación de formas de nitrógeno procedentes del metabolismo de estos organismos. Por otra parte el aumento en líneas generales de la relación $\delta^{15}\text{N}$ de las algas co-cultivadas con estos organismos indica que están retirando del medio formas de nitrógeno que de una u otra manera tienen origen antrópico, lo que demuestra los beneficios ambientales de estos cultivos.

Al menos en las rías gallegas es preferible el desarrollo de sistemas de acuicultura multitrófica peces-moluscos-algas en mosaico frente a sistemas contiguos, lo que tiene importantes implicaciones a la hora de la futura ordenación litoral de la producción acuícola. Además esta disposición en mosaico no condiciona ni la proporción de unos y otros cultivos ni sus técnicas de manejo.

El futuro de estos cultivos de *Saccharina latissima* “outdoor” están comprometidos únicamente por los procesos tempranos de epifitismo y depredación, eventos que precisan de más investigaciones para conocer sus causas reales y así desarrollar aquellas estrategias que puedan eliminarlos o, al menos, minimizarlos lo más posible.

*Sección IV - Desarrollo y optimización
de las técnicas de cultivo “indoor” de
Saccharina latissima y estudio de su
integración en sistemas multitróficos*



Capítulo 7 - Cultivos de *S. latissima* en “raceway”

7-1. Introducción

Esta experiencia “indoor” fue realizada en la planta de cultivo de peces planos AQUACRÍA AROUSA S.L., ubicada en la Ría de Arousa (Cambados, Pontevedra). Durante las experiencias esta piscifactoría trabajaba con rodaballo (*Scophthalmus maximus*) y, experimentalmente, con lenguado (tanto *Solea solea* como *S. senegalensis*) en un sistema de recirculación diseñado y desarrollado por la propia empresa. Actualmente trabaja exclusivamente con lenguado (*Solea senegalensis*). La granja tenía en ese momento una superficie de tanques de cultivo de 10.500 m², ubicados en un edificio aislado. El tratamiento de aguas incluye la filtración mecánica, filtración biológica, el control de gases, la oxigenación y la esterilización (ozono y UV). La capacidad de producción era de 500 toneladas/año.



Figura 7-1. Ubicación de la planta de cultivo de peces planos AQUACRÍA AROUSA S.L. en Cambados (Pontevedra), Ría de Arousa.

7-2. Material y métodos

La duración de la experiencia fue del 03/2008 al 06/2008 y el sistema empleado para el cultivo de *Saccharina latissima* fue un canal en hipódromo (“raceway”) de 1 m de ancho por 30 cm de alto en el que se dispusieron cada 2m y transversalmente a la corriente

líneas con 12 ejemplares adultos de *S. latissima* fijados atrapando sus estipes con una cinta de Velcro® mantenida tensa en perpendicular al canal mediante ventosas desmontables. El propio sistema rizoidal de las algas hacía de tope para que no se las llevara la corriente. Los ejemplares eran de una talla media de unos 80 cm y hasta ese momento habían sido cultivados en suspensión en la planta de cultivo de algas del IEO en Santander. Este canal en hipódromo estaba alimentado por un flujo regulable del agua del efluente de los peces después de pasar por los sistemas de filtración mecánica. El flujo se regulaba de manera manual de tal forma que se garantizara el hidrodinamismo suficiente para romper el régimen laminar y así el crecimiento de la especie fuera óptimo. Se pretendía estimar periódicamente la tasa de crecimiento de las algas y la concentración de macronutrientes y gases disueltos en el agua antes y después de su paso por la zona de cultivo. Para registrar la temperatura se pusieron también en el canal sensores de medición continua con “data loggers” HOBO® Pendant (Onset Computer Corporation, USA), uno en la cabecera y otro en el desagüe.

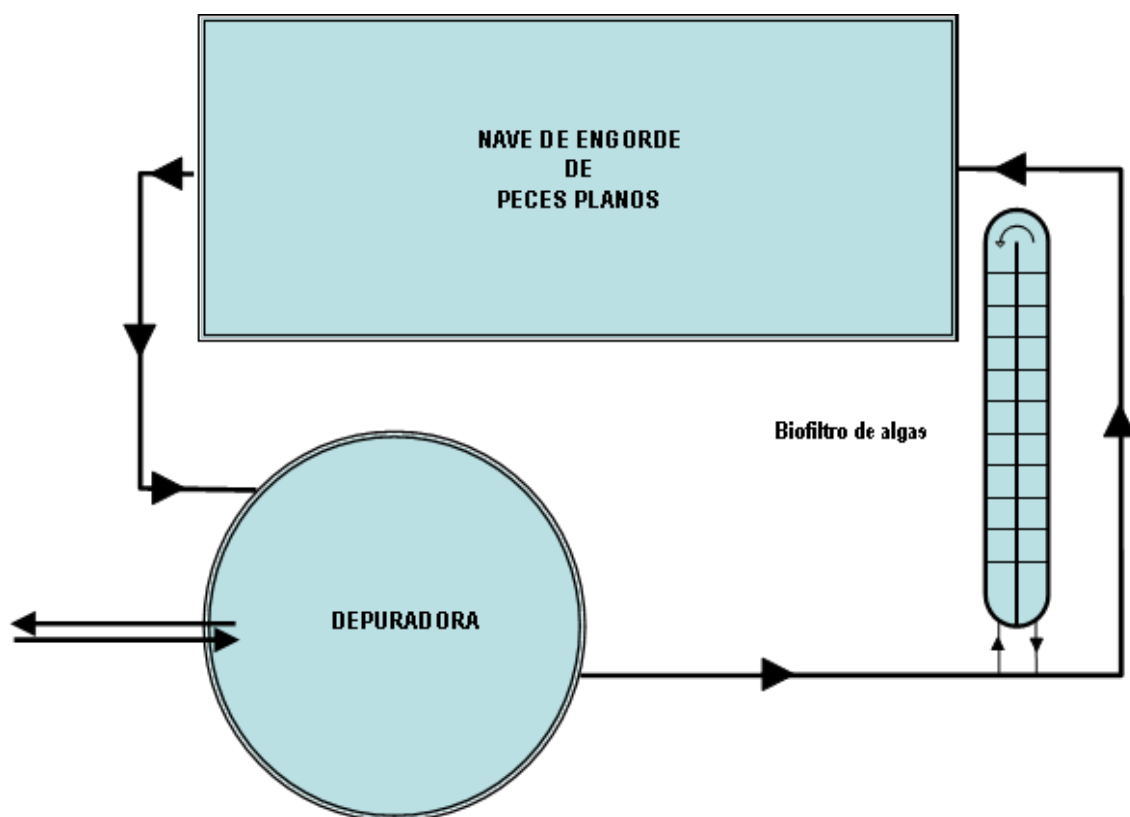


Figura 7-2. Esquema de la disposición del cultivo de *Saccharina latissima* que pretendidamente debía actuar como biofiltro en el sistema de recirculación de la planta de peces.



Figura 7-3. Detalle de los ejemplares de *Saccharina latissima* utilizados y su disposición y montaje en la experiencia.

7-3. Resultados

A pesar de que las condiciones de cultivo eran las idóneas para el desarrollo de la especie, el crecimiento de las plantas se detuvo nada más empezar el experimento sin saber la causa. Después de muchas indagaciones y al certificar la mortalidad de las algas concluimos que probablemente estábamos ante un problema de toxicidad debido a la composición química del agua como consecuencia de su propia naturaleza en recirculación o por algún protocolo de desinfección rutinaria de este tipo de instalaciones que no afecta a los peces pero que pudiera resultar letal para las algas. Es por ello que desde el mes de septiembre de ese mismo año se realizaron distintos ensayos toxicológicos en las instalaciones del Instituto Español de Oceanografía en Santander para valorar inicialmente el comportamiento de esta especie a distintas concentraciones y tiempos de exposición a tres de los desinfectantes más utilizados en las instalaciones acuícolas: formaldehído, peróxido de hidrógeno y cloruro de benzalconio. Los resultados obtenidos en estas experiencias demuestran que esta especie es muy sensible a estos tratamientos (Salinas *et al.*, 2009) y que en concreto en este caso sufrió los efectos letales del formaldehído, tema que se tuvo en cuenta para el diseño de los siguientes experimentos realizados en la presente memoria.

7-4. Conclusiones

En el sistema de cultivo de *Saccharina latissima* en “raceway”, a pesar de que las condiciones de iluminación, temperatura e hidrodinámica eran las idóneas para el desarrollo de la especie, las plantas se murieron a causa de una intoxicación por formaldehído usado en tratamientos tópicos de los peces.

Dado que en este sistema el necesario movimiento de las algas se debe conseguir mediante un gran caudal de agua circulante, que por otra parte no se puede interrumpir mucho tiempo (por ejemplo durante los tratamientos), los fenómenos de toxicidad se incrementan puesto que por muy baja que sea la concentración del tóxico el necesario caudal hace que las algas puedan acumular cantidades letales del mismo aunque éste se encuentre en muy bajas concentraciones. Este sistema sólo sería viable para circuitos en los que se garantice que en ningún momento el agua del efluente que pase por las algas tenga compuestos fitotóxicos.

Capítulo 8 - Cultivos de *S. latissima* en suspensión

8-1. Cultivo de *Saccharina latissima* en suspensión en tanques en paralelo con efluentes de cultivo de peces

8-1.1. Introducción y objetivos

El siguiente experimento fue realizado con la idea de desarrollar y optimizar el cultivo en suspensión de *Saccharina latissima* utilizando para ello el agua de un efluente de la misma planta de cultivo de peces AQUACRÍA AROUSA S.L. utilizada en la experiencia del Capítulo 7 (fig. 8-1). Se pretende en esta nueva experiencia avanzar en el conocimiento de los factores limitantes vinculados a la producción en un modelo de cultivo intensivo en suspensión de *S. latissima* en tanques dispuestos en paralelo utilizando dichos efluentes. Estos factores principales son los relacionados con el aporte de nutrientes y las densidades de cultivo, factores a su vez influenciados por la intensidad y calidad de luz incidente. Se pretende con ello aportar datos que sean de utilidad para el cultivo más eficiente de esta especie en este tipo de sistemas integrados; es decir, establecer los parámetros que permitan una máxima producción de alga por unidad de superficie con el menor gasto energético de bombeo necesario para la renovación de agua.

8-1.2. Material y Métodos

Las experiencias fueron realizadas entre el 16/03/2011 y el 16/05/2011. Para todas ellas se utilizaron cuatro tanques troncocónicos de polietileno blanco rotomoldeado, de 1750 litros de capacidad operativa y 160 cm de diámetro con un índice RSV (relación superficie en dm^2 /volumen en litros) de 0,1207 y con un desagüe superior de 15 cm de diámetro protegido por una malla plástica de 5 mm de luz. Los tanques fueron dispuestos en paralelo recibiendo cada uno de ellos el mismo caudal de efluente. Las experiencias fueron realizadas en unas instalaciones al aire libre montadas anexas a la planta de cultivo de peces planos (fig. 8-2).

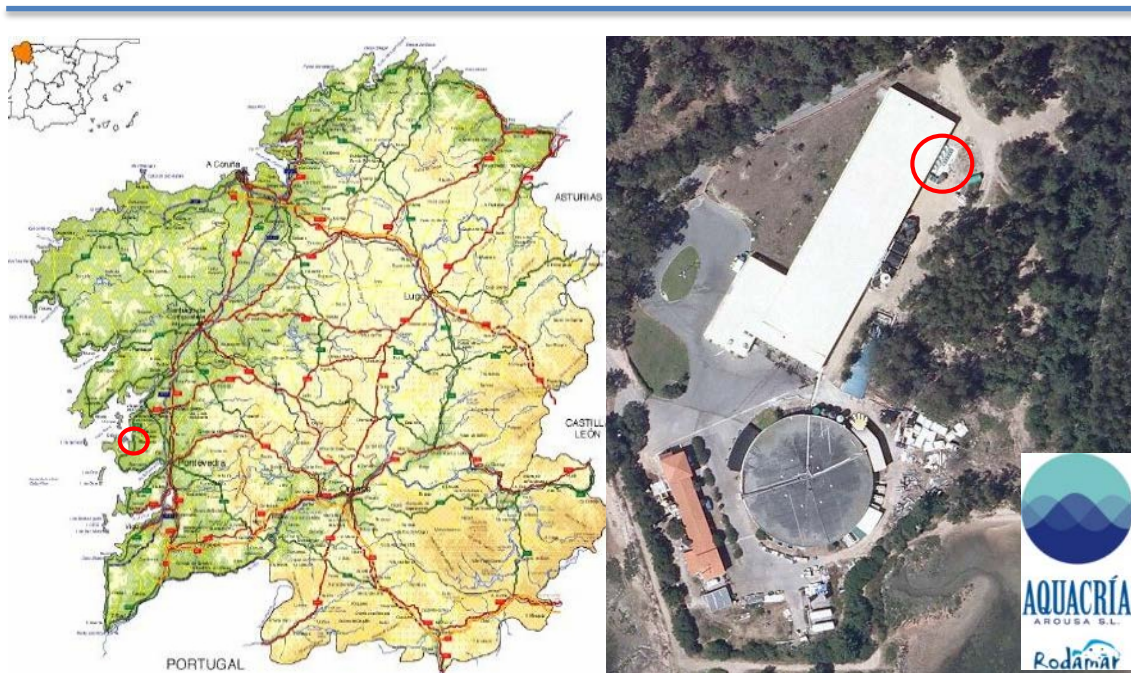


Figura 8-1. Ubicación de la planta de peces AQUACRÍA AROUSA S.L. en Cambados (Pontevedra) y localización de las instalación de cultivo de *Saccharina .latissima* asociada a la planta de cultivo de peces.

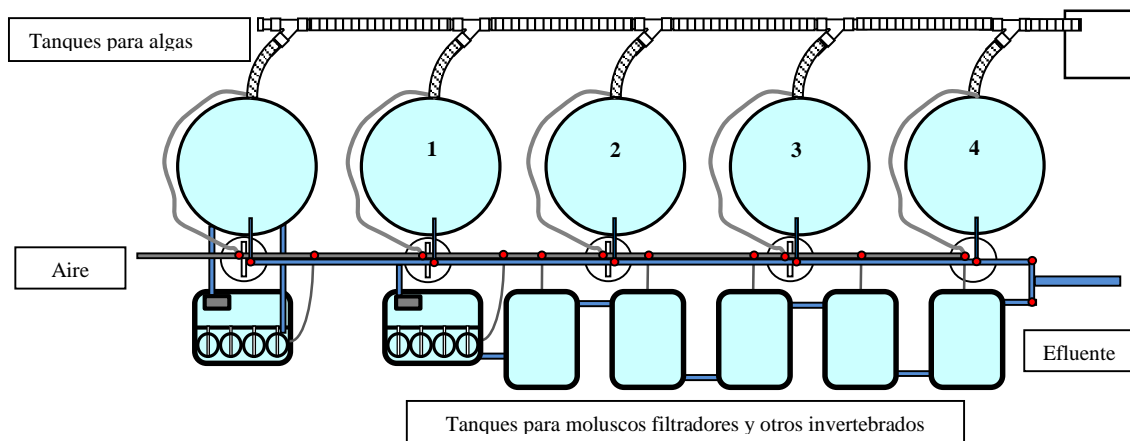


Figura 8-2. Esquema general de la instalación de cultivo.

El régimen de iluminación fue el natural de la ubicación (42° 28' 12.04"N, 8° 49' 41.58"W). La luz incidente y la temperatura del agua en el interior de los tanques fue medida utilizando “data loggers” HOBO® Pendant (Onset Computer Corporation, USA) programados para lecturas cada 15 minutos. También fue medido regularmente el pH con un pHmetro portátil Crison 507.

Para garantizar el movimiento de las algas, necesario tanto para la captación de luz al pasar por la superficie como para la renovación de nutrientes, se estableció un régimen hidrodinámico continuo mediante inyección de aire por el lateral inferior del tanque con un caudal total aproximado de 1500 l/min, el cual aporta un hidrodinamismo de grado medio con movimiento circular de las algas y una velocidad máxima del agua en superficie de 25 cm/s para mitigar la rotura de las plantas.

El agua utilizada en el experimento, según los datos facilitados por la propia empresa, tenía la analítica básica que se especifica en la tab. 8-1 y pertenece al efluente que, tras pasar por los peces, es filtrado mecánicamente para eliminar las partículas superiores a 70 µm. Su entrada en los tanques se realizó a través de una bomba de agua secundaria con cuerpo impulsor de nylon y funcionamiento controlado por reloj programador que permite controlar el régimen de renovación del agua.

Alcalinidad total (mg/l)	103
pH	7,13
NH₄⁺ (mg/l)	0,39
NO₂⁻ (mg/l)	0,2
NO₃⁻ (mg/l)	45,45
PO₄⁻ (mg/l)	3,82
O₂ (mg/l)	12,11
T (°C)	17,74
Salinidad (‰)	32
CO₂ libre (mg/l)	7,48

Tabla 8-1. Analítica media del agua del efluente utilizada en las experiencias.

Para el estudio se han utilizado plantas juveniles de *Saccharina latissima* obtenidas a partir del banco de germoplasma de la Planta de Cultivo de Algas del IEO en Santander. por el procedimiento habitual y precultivo en suspensión de plántulas de 2-4 mm desprendidas del hilo de semilla mediante fuerte hidrodinámica hasta una talla aproximada de 10-20 cm, talla a la que se introdujeron técnicas de cultivo ralentizado (mediante control de iluminación y temperatura) para limitar su crecimiento.

Los valores de biomasa se obtuvieron semanalmente pesando todas las plantas después de 15 min de escurrido. Para reducir la variabilidad entre tanques tras cada muestreo la biomasa se mezclaba y homogenizaba para ser dividida de nuevo en alícuotas. Las biometrías (peso, largo y ancho de lámina) se realizaron sobre 60 ejemplares de cada tanque. Al final de la experiencia se analizó también su contenido en nitrógeno. La tasa de crecimiento relativo se utilizó la ecuación de Hunt (1982) ya usada anteriormente.



Figura 8-3. Aspecto general de la instalación, dos fases del llenado de un tanque con las jóvenes plantas de *Saccharina latissima* y detalle de las mimas ya en pleno crecimiento.

En algunas experiencias se realizaron analíticas del agua de cultivo con la idea de conocer principalmente el consumo de NO_3^- para poder estimar el caudal necesario de renovación para mantener el crecimiento óptimo. Este consumo fue valorado mediante el empleo del Test de nitratos en agua de mar de Merck y lectura en cubeta con un espectrofotómetro Spectroquant® Nova 60.

8-1.3. Diseño experimental

Dado que las experiencias de cultivo en suspensión de *Saccharina latissima* en efluentes de piscifactoría carecen de antecedentes el objetivo de las experiencias que aquí se presentan fue conocer, al menos de forma preliminar, la influencia sobre la producción de las principales variables de cultivo como la luz, los nutrientes, el pH y la densidad de planta.

La primera experiencia intentó conocer y limitar la posible fitotoxicidad de la luz natural incidente considerando que tanto una intensidad excesiva como la posible radiación ultravioleta en el área de trabajo (muy diferente al ambiente en que *S. latissima* vive) podría inhibir la fotosíntesis de las algas por destrucción de los fotosistemas al formarse con la energía sobrante especies químicas altamente reactivas, tales como peróxidos, radicales hidroxilo, superóxidos, etc. que producen fotooxidación y muerte de los ejemplares. Por ello, sin renovación de agua, se realizaron unas cortas experiencias de desarrollo en dos densidades distintas, primero utilizando una tapa protectora de la radiación ultravioleta de policarbonato traslúcido (“hielo”) de 6 mm -que según el fabricante absorbe además un 40% de la radiación incidente- y, después, sin esta tapa.

Una vez establecida la iluminación más adecuada se estudió la capacidad de las algas para consumir los nutrientes del medio con la idea de establecer el régimen de renovación mínimo necesario para que su crecimiento se mantenga en valores óptimos de producción. Para ello se analizó cada dos o tres días la disminución de la concentración de nitratos durante doce días de cultivo (del 16/03 al 28/03), sin renovación de agua y utilizando dos distintas densidades iniciales de algas.

La tercera experiencia estudio el comportamiento del cultivo con dos densidades iniciales, primero sin renovación y después con una renovación diaria de un cuarto del

tanque en la hora de mayor intensidad fotosintética (13-14h) para intentar controlar los valores de pH que se podrían alcanzar en los tanques de mayor densidad de cultivo. Con este alto grado de renovación de agua se pretendía también comprobar si *S. latissima* era capaz de crecer de forma continua en un ambiente fuertemente eutrofizado.

Finalmente se hizo un experimento encaminado al conocimiento de la densidad óptima de cultivo; es decir, aquella que de un rendimiento neto más elevado. Para ello se partió de una única densidad inicial en los cuatro tanques de 1,5 kg/m³ para semanalmente estimar el incremento de biomasa en cada uno de ellos. Cuando este incremento sea significativamente menor que el de la semana anterior significará que se ha sobrepasado la densidad óptima.

8-1.4. Resultados y discusión

8-1.4.i. Evolución de la temperatura y luz incidente en los tanques

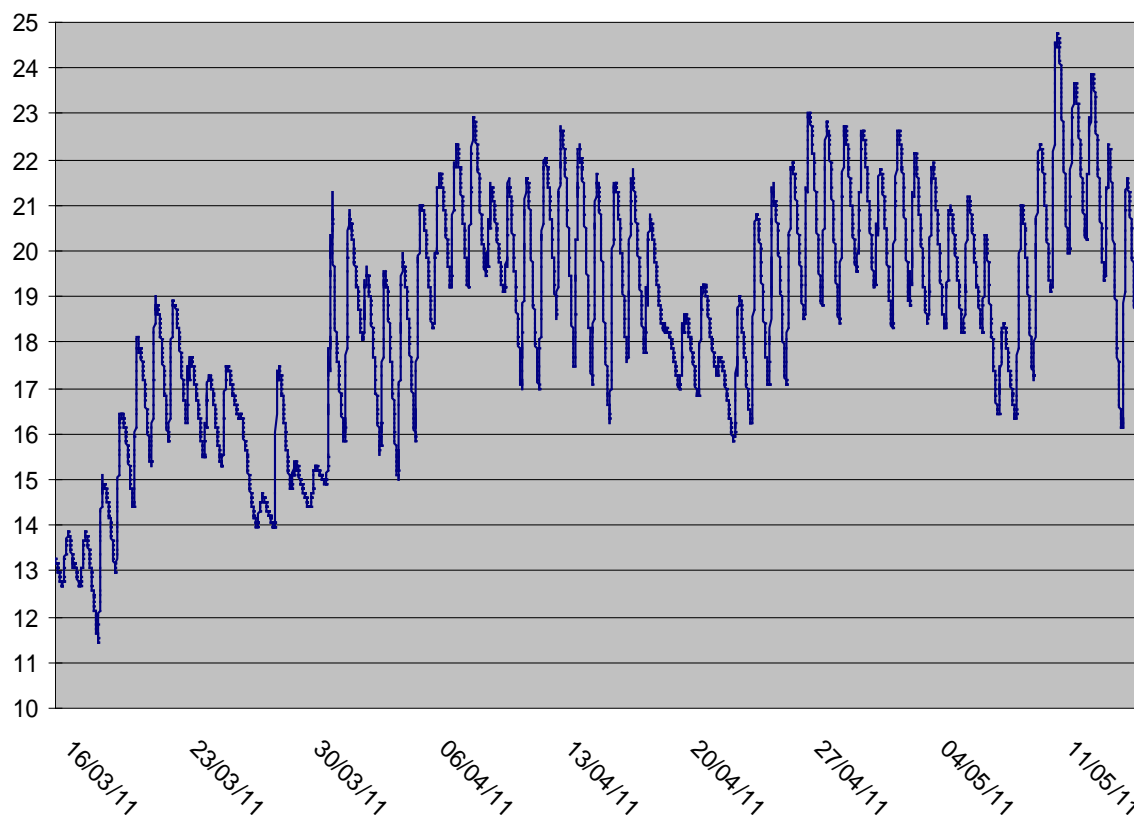


Figura 8-4. Evolución de la temperatura del agua (° C) en los tanques durante las experiencias.

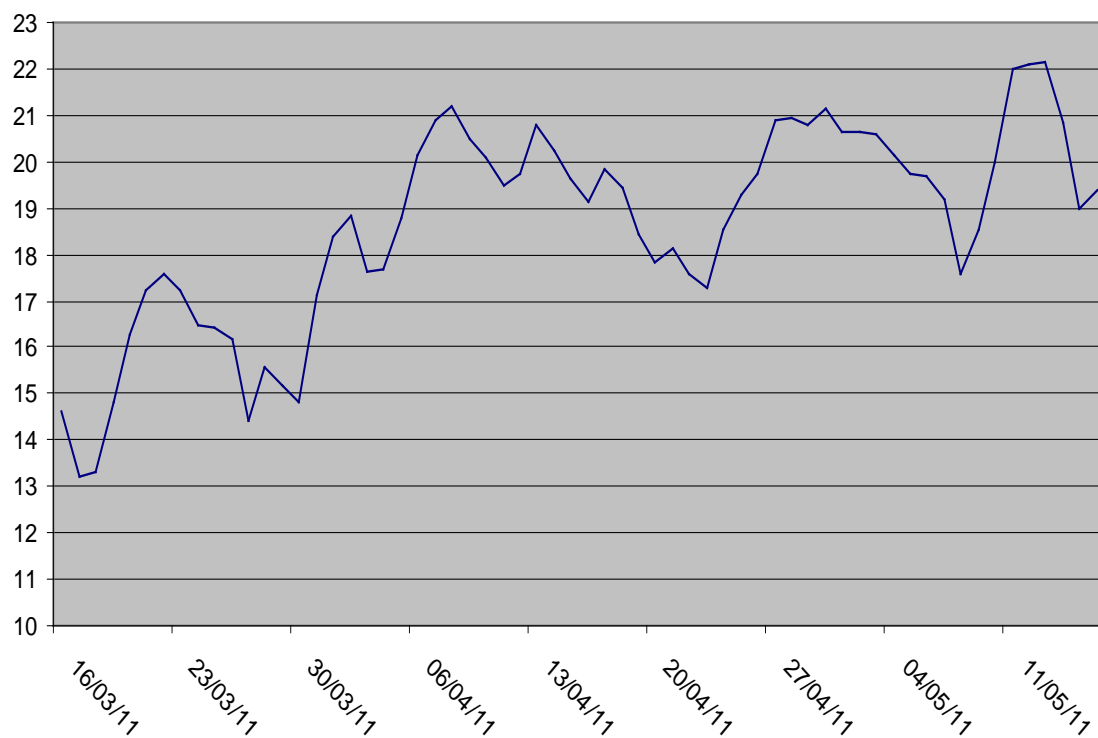


Figura 8-5. Evolución de la temperatura media diaria del agua (° C) en el interior de los tanques durante las experiencias.

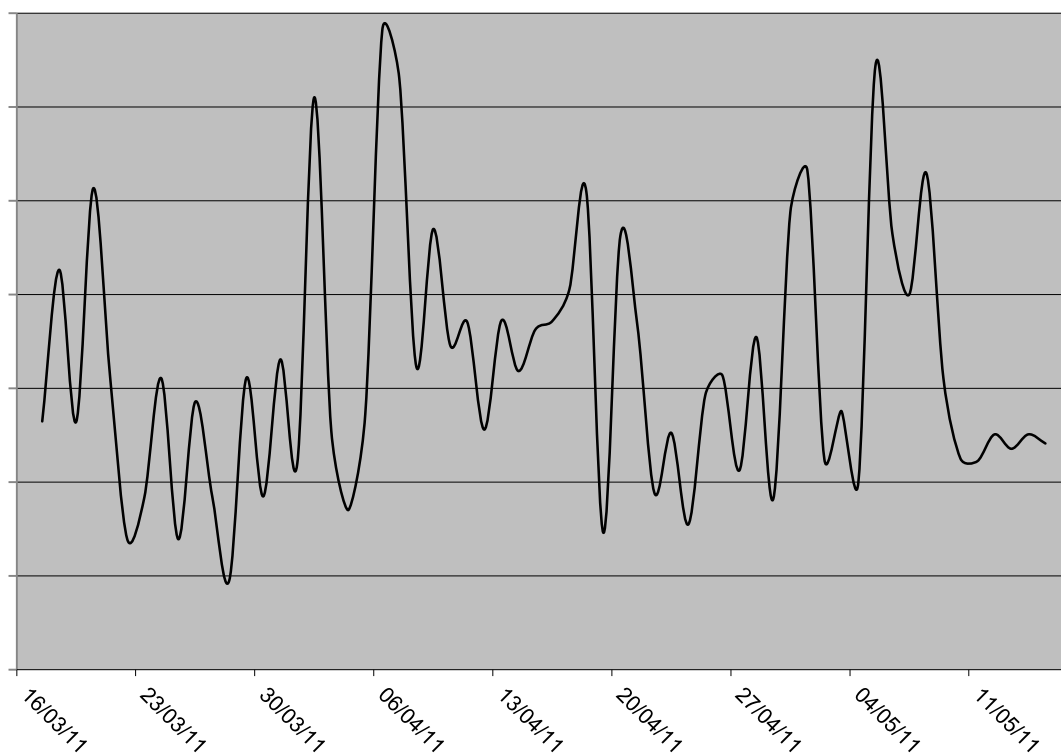


Figura 8-6. Evolución de la dosis lumínica relativa diaria en la superficie de los tanques durante las experiencias.

8-1.4.ii. Experiencia 1: Conocer y limitar la posible fitotoxicidad de la luz natural incidente

8.1.4.ii.1 Condiciones experimentales

Sin renovación de agua, dos tanques con densidad inicial de 1 kg/m³ y otros dos con densidad inicial de 2 kg/m³. Una semana con tapa de policarbonato que filtra los UV y deja pasar el 60% de la luz incidente. Cambio de agua y otra semana sin tapa. Estima de biomasa semanal.

8.1.4.ii.2 Resultados obtenidos

Período	Tq.	d (kg/m ³)	días cult.	Po (kg)	Pt (kg)	incr. (kg)	TCR (% día)
16/03 a 23/03	1	1	7	1,75	2,93	1,18	7,4
	2			1,75	3,01	1,26	7,7
	3	2		3,50	5,10	1,60	5,4
	4			3,50	5,33	1,83	6,0

Tabla 8-2. Incremento de biomasa y tasa de crecimiento en los tanques con tapa.

Período	Tq.	d (kg/m ³)	días cult.	Po (kg)	Pt (kg)	incr. (kg)	TCR (% día)
28/03 a 04/04	1	1	7	1,75	2,90	1,15	7,2
	2			1,75	2,92	1,17	7,3
	3	2		3,50	4,79	1,29	4,5
	4			3,50	4,75	1,25	4,4

Tabla 8-3. Incremento de biomasa y tasa de crecimiento en los tanques sin tapa.

8.1.4.ii.3 Discusión

A la vista de los resultados queda claro tanto que la luz en ningún momento llegó a ser tóxica puesto que en ambas experiencias el cultivo a menor densidad se mantuvo en una tasa de crecimiento superior al 7% día, tasa óptima de crecimiento para esta especie según la bibliografía (Lüning, 1979; Dring et al, 1996) y nuestra experiencia previa. Aunque el número de réplicas no permite un análisis estadístico riguroso, las algas de los tanques tapados presentaron una tasa de crecimiento algo mayor que la de los destapados, sobre todo en los de doble densidad. La explicación podría estar en las diferencias en dosis lumínica de cada período ensayado pero, curiosamente, la semana de 16/03 al 23/03 fue algo menos luminosa que la del 28/03 al 04/04 (fig. 8-6) y, además, las tapas de los tanques eliminan aproximadamente un 40% de la radiación incidente. Por la alta tasa de crecimiento obtenida parece que la intensidad lumínica, aun con tapa, fue suficiente para saturar en ambos casos los fotosistemas de las algas, por lo que las diferencias observadas

pueden ser debidas al efecto inhibidor de la radiación ultravioleta más que a una carencia de intensidad lumínica. Este efecto inhibidor ha sido ya documentado por muchos autores (Dring *et al.*, 1996; Mora *et al.*, 2000).

Obviamente la densidad es inversamente proporcional a la tasa de crecimiento puesto que a mayor densidad la frecuencia de que cada planta pase por superficie cada vez es menor; pero aun así el incremento neto de biomasa en los tanques de doble densidad es mayor que en los de sencilla; eso quiere decir que aún no hemos sobrepasado la densidad óptima de cultivo desde el punto de vista productivo.

8-1.4.iii. Experiencia 2: Dinámica de consumo de nutrientes (NO_3^-)

8.1.4.iii.1 Condiciones experimentales

Sin renovación de agua y sin tapa, dos tanques con densidad inicial de 1 kg/m^3 y otros dos con densidad inicial de 2 kg/m^3 . 12 días de cultivo. Medida de nitrato cada 2 o 3 días. Estima de biomasa semanal.

8.1.4.iii.2 Resultados obtenidos

	<i>tanques 1&2 (1 kg/m^3)</i>		<i>tanques3&4 (2 kg/m^3)</i>	
<i>Fecha</i>	$\text{NO}_3^- \text{ mg/l}$	Incr. (kg)	$\text{NO}_3^- \text{ mg/l}$	Incr. (kg)
16/03/2011	7	0	7	0
18/03/2011	6,45		6,55	
21/03/2011	4		3,55	
23/03/2011	4,05	1,22	3,95	1,72
25/03/2011	3,2		3,1	
28/03/2011	2,9	2,18	2,6	2,67

Tabla 8-4. Consumo de nitrato e incremento de biomasa.

8.1.4.iii.3 Discusión

En ambas densidades se observa que tras 12 días de cultivo aún queda en el agua de los tanques más de un tercio de los nitratos iniciales y que esta disminución es pareja al incremento de biomasa en *Saccharina latissima*. Como en el experimento anterior con doble densidad se alcanza un mayor rendimiento neto que con densidad simple, 2,67 kg frente a 2,18 kg y, por ello, con el nitrato remanente ocurre justo lo contrario, 2,6 mg/l frente a 2,9 mg/l.

Se observa también en los datos que la asimilación de nitrato no es un proceso constante e, incluso, entre los días 21 y 23 en ambas densidades fue prácticamente nula o negativa (la analítica mediante kits en algunos casos puede ser algo imprecisa). De todas formas es sabido por la bibliografía (Lobban & Harrison, 1994) que muchas algas cuando se encuentran en presencia de abundantes fuentes de nitrógeno inicialmente lo acumulan para después ir usándolo a medida que lo precisan.

8-1.4.iv. Experiencia 3: Influencia de la renovación de agua

8.1.4.iv.1 Condiciones experimentales

Dos tanques con densidad inicial de 1 kg/m³ y otros dos con densidad inicial de 2 kg/m³. Sin tapa. Una semana sin renovación de agua, cambio de agua y otra semana con renovación de ¼ del tanque por día a las 13-14h. Estima de biomasa semanal.

8.1.4.iv.2 Resultados obtenidos

Período	Tq.	d (kg/m ³)	días cult.	Po (kg)	Pt (kg)	incr. (kg)	TCR (% día)
28/03 a 04/04	1	1	7	1,75	2,90	1,15	7,2
	2			1,75	2,92	1,17	7,3
	3	2		3,50	4,79	1,29	4,5
	4			3,50	4,75	1,25	4,4

Tabla 8-5. Incremento de biomasa y tasa de crecimiento en los tanques sin renovación de agua.

Período	Tq.	d (kg/m³)	días cult.	Po (kg)	Pt (kg)	incr. (kg)	TCR (% día)
04/04 a 11/04	1	1	7	1,75	2,73	0,98	6,4
	2			1,75	2,83	1,08	6,9
	3	2		3,50	5,26	1,76	5,8
	4			3,50	5,20	1,70	5,7

Tabla 8-6. Incremento de biomasa y tasa de crecimiento en los tanques con renovación de agua.

8.1.4.iv.3 Discusión

Lo más significativo de esta experiencia es que *Saccharina latissima* es capaz de vivir de forma continua y desarrollarse adecuadamente en aguas con altas tasas de nutrientes (tanques con renovación), y que la producción en los tanques de doble densidad mejora significativamente con la renovación de agua. Si en los tanques de densidad sencilla las diferencias de tasa de crecimiento en ambos casos son pequeñas y seguramente no significativas: 7,25 frente a 6,6, y curiosamente más altas en los tanques sin renovación,

ocurre todo lo contrario en los tanques con doble densidad, donde la diferencias medias de tasa de crecimiento son significativamente más elevadas: 5,75 frente a 4,45 y, precisamente, más altas en los tanques con renovación. La causa de esta mejora en los tanques de doble densidad seguramente sea que con la renovación de ¼ del tanque a la hora de máxima intensidad fotosintética el estrés debido al incremento de pH (más llamativo en los tanques de doble densidad, en los que en la primera semana puntualmente se llegó a valores de pH de 9-9,2) fue eliminado en gran medida al reponer la reserva alcalina con el agua del efluente de pH cercano a 7, no sobrepasando ya valores de 8,7.

8-1.4.v. Experiencia 4: Estudio de la densidad óptima de cultivo

8.1.4.v.1 Condiciones experimentales

Inicialmente cuatro tanques con densidad de 1,5 kg/m³. Sin tapa y con renovación. Estima de biomasa semanal, homogenización y distribución de alícuotas.

8.1.4.v.2 Resultados obtenidos

Período	Tanque.	d (kg/m ³)	días cult.	Po (kg)	Pt (kg)	incr. (kg)	TCR (% día)
11/04 a 18/04	1	1,5	7	2,64	3,81	1,19	5,3
	2				3,7	1,08	4,9
	3				3,69	1,07	4,9
	4				3,61	0,99	4,6
18/04 a 25/04	1	1,98	7	3,47	4,43	0,96	3,5
	2				4,66	1,19	4,2
	3				4,43	0,96	3,5
	4				4,42	0,95	3,5
25/04 a 02/05	1	2,49	7	4,35	4,43	1,14	3,3
	2				4,66	1,32	3,8
	3				4,43	0,82	2,5
	4				4,42	1,29	3,7
02/05 a 10/05	1	2,86	8	5	Accidentado		
	2				6,64	1,64	3,5
	3				6,14	1,14	2,6
	4				6,11	1,11	2,5
10/05 a 16/05	1	4	6	7	4,43	-2,57	-7,6
	2				5,15	-1,85	-5,1

Tabla 8-7. Incremento de biomasa y tasa de crecimiento semanales entre el 11/04 y el 16/05.

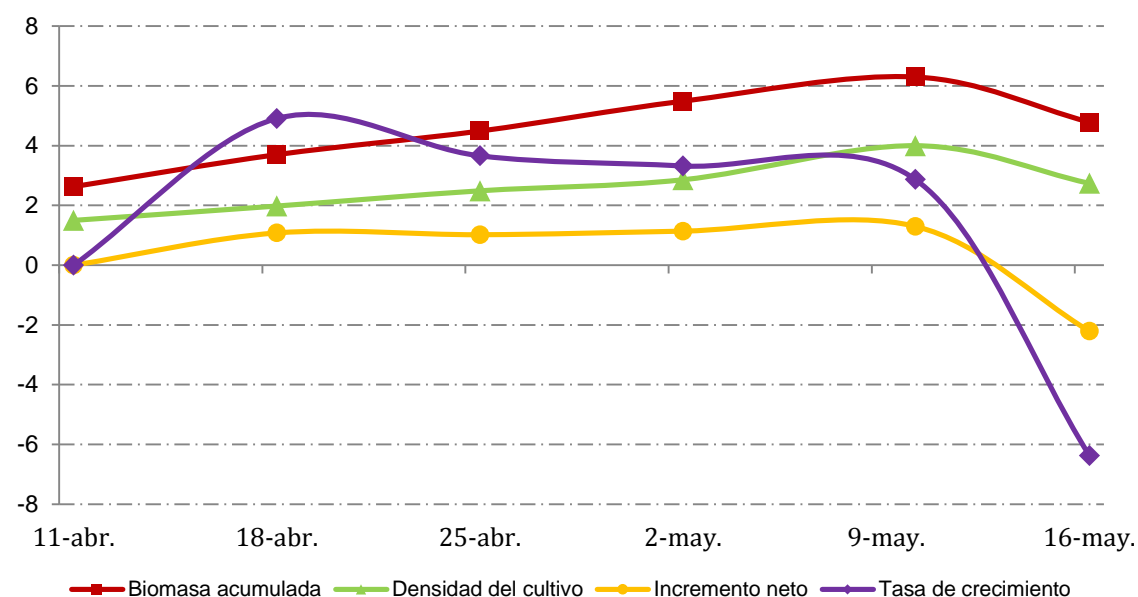


Figura 8-7. Evolución de la biomasa acumulada (kg), densidad de cultivo (kg/m³), incremento neto (kg) y tasa de crecimiento (% día) de *Saccharina latissima* a lo largo del experimento.

8.1.4.v.3 Discusión

El objetivo de este experimento no era otro que llegar a conocer la densidad óptima de cultivo para una máxima producción, pero lamentablemente no se pudo concluir con éxito debido a que las condiciones ambientales en las dos últimas semanas de la experiencia fueron limitantes para el desarrollo de *Saccharina latissima*. Sabemos por la bibliografía (Lüning, 1990) y por experiencias previas que esta especie tolera muy mal temperaturas superiores a los 18° C y que las superiores a 20° C resultan letales, de ahí su escasa distribución en nuestras costas (Izquierdo *et al.*, 1993). Se tenía la esperanza de que en el cultivo en tierra el marcado descenso nocturno de la temperatura de los tanques (fig. 8-4) pudiera amortiguar un poco este efecto letal, pero incluso varios días de la última semana la temperatura mínima de los tanques superó los 20° C. En estas condiciones *Saccharina latissima* detiene su crecimiento e intenta sobrevivir movilizand nutrientes de las partes apicales de la lámina, que se vuelve débil y quebradiza, de ahí la tasa de crecimiento negativa que se aprecia en la última semana de la experiencia (fig. 8-7).

De todas formas en las cuatro primeras semanas del experimento se aprecia un aumento lineal de la biomasa y, lo que es más importante, un pequeño incremento neto en las cifras de producción semanal hasta densidades de 4 kg/m³.

8-1.5. Conclusiones

De estas experiencias pioneras se concluye que el cultivo en suspensión de *Saccharina latissima* en tanques utilizando el efluente de una granja de peces en circuito cerrado es perfectamente viable y productivo al menos hasta el mes de abril. La alta concentración de nutrientes por lo tanto no resulta tóxica para esta especie, ni de manera aguda ni de manera crónica.

La luz incidente en estas condiciones no es limitante ni por exceso ni por defecto para el desarrollo de esta especie, si acaso es conveniente poner algún recubrimiento que filtre la radiación ultravioleta para una mayor productividad. Si se quisiera aumentar la producción habría que incidir más que en la intensidad lumínica en el diseño de los tanques, movimiento de las algas y, en su caso, en un aumento del fotoperíodo con el auxilio de lámparas de poco consumo dada la eficiencia fotosintética de la especie.

Por la alta concentración de nutrientes de los efluentes de este tipo de granjas la tasa de renovación del agua de los tanques puede ser muy baja, con el ahorro energético que ello supone. Sin embargo, si la renovación es excesivamente baja debería instalarse un sistema automático de medición y corrección de pH para evitar oscilaciones letales del mismo.

La densidad de cultivo óptima desde el punto de vista productivo es como mínimo de 4 kg/m³; no se ha podido llegar más allá en este caso por acabarse en el transcurso de la experiencia la estación adecuada para el cultivo de la especie.

8-2. Cultivo de *Saccharina latissima* en suspensión en tanques en serie con efluentes de cultivo de peces

8-2.1. Introducción y objetivos

Las experiencias realizadas en esta ocasión, de cultivo de *Saccharina latissima* en tanques en serie utilizando el efluente de un cultivo de peces pretenden complementar las anteriormente realizadas y que no se pudieron concluir adecuadamente por adentrarse la estación desfavorable para el cultivo de esta especie en suspensión. Estas nuevas experiencias se centraron por lo tanto en avanzar en el conocimiento de la densidad óptima de cultivo, de la influencia de la talla de las plantas sobre su tasa de crecimiento y de la capacidad de biofiltración de NH_4^+ NO_2^- NO_3^- y PO_4^- , así como estudiar las variaciones de pH y de reserva alcalina del agua a lo largo del sistema. Por otra parte con este sistema de tanques dispuestos en serie se pretende conocer la respuesta de la concentración de nutrientes en el desarrollo de *S. latissima* y su influencia sobre la respuesta al estrés que pueda sufrir la especie durante las experiencias de cultivo con respecto al efecto sinérgico del incremento de temperatura, intensidad lumínica y fotoperíodo al acercarse el final de la época de cultivo.

8-2.2. Metodología general

8-2.2.i. Emplazamiento e instalaciones

Estas experiencias, como las que ya se trataron en el Capítulo 5, se encuadraron en la acción de investigación de la Consellería do Medio Rural e do Mar (Xunta de Galicia) denominada “Acción Multitróficos” y que se desarrolló desde marzo de 2013 hasta diciembre de 2014. Como las anteriores fueron realizadas en las instalaciones del IGaFA (Instituto Galego de Formación en Acuicultura) que se encuentra ubicado en el noroeste de la Isla de Arousa (Pontevedra), y es un centro especializado en la formación profesional dirigida al ámbito de la acuicultura y buceo profesional.



Figura 8-8. Emplazamiento del IGaFA y plano de detalle con la ubicación de los tanques.

El cultivo de algas se realizó en cuatro tanques tronco-cónicos dispuestos en serie y con burbujeo en el vértice del cono necesario para el necesario movimiento de las algas en suspensión. Los tanques son de 1300 cm de altura y 90 cm de diámetro y su volumen aproximado es de 250 litros. Son de fibra de vidrio y poseen una válvula de PVC en la base para regular y equilibrar el flujo de aire que fue suministrado por un compresor de pistón seco con un caudal de 120 l/min suficiente para alimentar los cuatro tanques mediante un anillo formado por un tubo de silicona. Esta dispensación en anillo facilita el equilibrio de burbujeo en los distintos tanques.



Figura 8-9. Acotaciones de los tanques de cultivo.

Los cuatro tanques se colocaron al aire libre en un lateral de la planta de cultivo de peces de las instalaciones experimentales del IGaFA de cuyo efluente se extrajo el suministro de agua para las algas. La orientación del muro al que están anexos es de 320° (N-NO), por lo que el sol en el periodo ensayado sólo incide directamente en los tanques al atardecer. Se supone que esta ubicación beneficia más que perjudica debido a que ayuda a mantener las temperaturas frescas en estos pequeños volúmenes de agua, que de recibir directamente la luz solar durante gran parte del día hubieran sido sin duda mucho más elevadas. Los tanques están colocados en pendiente lo que permite el trasvase del agua de tanque a tanque por simple rebosamiento.

En la salida de cada tanque se instalaron distintos tipos de filtros en los rebosaderos, todos ellos de superficie y tamaño de poro adecuado para evitar su taponamiento. En la parte final de la serie de tanques de cultivo se colocó un depósito de agua con el fin de monitorizar la sedimentación producida por el cultivo y redirigir el efluente final hacia los exteriores de las instalaciones.

El agua utilizada es el efluente de renovación del circuito semi-cerrado en que está siendo cultivado lenguado senegalés (*Solea senegalensis*). Dicha agua se toma antes de su paso por la serie de filtros que dispone el circuito, pero éste, al ser semi-cerrado, imposibilita recolectarla sin antes haber pasado en mayor o menor medida por los filtros

de arena, “skimers” y ozonizadores con los que cuenta la instalación. El agua del efluente se almacenaba en dos bidones de 100 litros interconectados (fig. 8-10) y tiene un flujo muy variable y que depende de los valores registrados por las diversas sondas de CO₂, pH y T situadas en la instalación. En uno de estos bidones se colocó una bomba regulada por temporizador que permite un flujo a intervalos para evitar que funcione en vacío. Esta bomba descargaba regularmente el agua del efluente contenida en los bidones en el tanque exterior de regulación de flujo situado sobre el nivel de los tanques de cultivo y con el que se conseguía racionar el agua entre los intervalos de bombeo y obtener así un flujo de alimentación del sistema prácticamente continuo y regulable en función de las necesidades.



Figura 8-10. Depósitos almacenaje de agua dentro de las instalaciones y depósito externo antes del suministro al tanque de cabecera del circuito en serie.

A continuación en la fig. 8-11 se muestra un modelo esquematizado del conjunto de las instalaciones de la experiencia. En él se aprecian todo los elementos necesarios para llevarla a cabo. Por un lado se observan en el interior las instalaciones de cultivo de peces (1) de las que se extraía el agua del efluente mediante una bomba y que se conducía mediante una manguera (2) a los exteriores. Allí se almacenaba en el depósito (3) situado por encima del nivel de los tanques. Desde el depósito y regulada a través de una válvula se hacía circular el agua desde el tanque de cabeza mediante otra manguera (4). A continuación se observan los tanques de cultivos colocados en serie y sus canalizaciones para el rebosamiento (5). En la parte inferior de cada uno se observa el circuito circular de aire (6) alimentado por el compresor que estaba al resguardo en la caseta (7).



Figura 8-11. Esquema de la instalación y aspecto real de los tanques en serie.

El cultivo interno de peces está constituido por un sistema de 9 tanques en batería con cuatro sistemas de filtrado básicos de los cuales dos influyen en la riqueza química de los efluentes. Por un lado están los espumadores o “skimers” que se encargan de retirar compuestos anfóteros del agua de cultivo, como son las proteínas, aminoácidos y otros compuestos de alto contenido en sustancias nutritivas para organismos vegetales. Por otro lado tiene dos reactores de lecho fluido con gran cantidad de bacterias nitrificantes que reducen el amonio a nitrato. También dispone de un filtro ultravioleta que, junto con el aporte de ozono, trabaja para minimización de los organismos patógenos. El sistema dispone igualmente de un filtro de tambor para la retirada de sólidos del agua de entrada.

8-2.2.ii. Parámetros ambientales

Durante las experiencias se realizó el seguimiento de diversos parámetros ambientales en los tanques. Uno de los más importantes es el porcentaje de insolación recibido durante el día por el cultivo, parámetro que no se monitorizó *in situ* pero que se estimó en la segunda experiencia con los datos de la estación meteorológica próxima de Corón, a pocos kilómetros de la planta. Las variaciones de temperatura fueron monitorizadas cada 15 minutos con la ayuda de termógrafos digitales sumergibles HOB0® Pendant (Onset Computer Corporation, USA) con “data-logger” dispuestos en los tanques extremos. El pH se monitorizó a intervalos de 15 minutos en algunos períodos de tiempo de las distintas experiencias mediante el empleo de un pHmetro de campo con “data-logger” modelo Delta HD 2105.2. También se realizaron en la segunda experiencia medidas de la reserva alcalina del agua para saber o descartar si una de la causa de las disminuciones de tasa de crecimiento que se pudieran encontrar a lo largo de la misma pudieran ser debidas a la falta del nutriente esencial de todas las plantas, el CO₂, o en este caso, para ser más exactos, el C inorgánico total del agua; puesto que a medida que las algas retiran CO₂ del medio, el tampón carbonato lo equilibra consumiéndose así paulatinamente la reserva alcalina. Para ello se medía mediante una sonda Oxyguard las ppm de CO₂ liberado en cada muestra de agua después de su acidificación. Siempre es más interesante comprobar en el agua de mar la reserva alcalina que la concentración de CO₂, que en el agua de mar tiene un valor casi constante de 2-3 ppm, dependiendo del pH (Chester & Jickells, 2012).

Para conocer la tasa de absorción de nutrientes las muestras del agua del efluente de los peces y del efluente del cuarto tanque de cultivo de algas fueron enviadas al Instituto

Tecnológico para o Control do Medio Mariño (INTECMAR, Xunta de Galicia) donde con un analizador QUAATRO fueron estimadas las concentraciones de compuestos nitrogenados y sílice y con un analizador AA3 los niveles de fósforo total. La estima de estrada de nutrientes en el sistema era aproximada ya que las descargas de nutrientes no son constantes a lo largo del tiempo, pero sí sirve para dar una idea de su orden de magnitud y, sobre todo, para estimar la tasa de biofiltración final en el efluente del último tanque.

8-2.2.iii. Estudios biométricos

En las distintas experiencias los muestreos fueron realizados con una cadencia más o menos semanal, cuando las plántulas eran aún muy pequeñas la estima de densidad de planta se realizaba mediante cinco conteos aleatorios de las plantas contenidas en los dos litros de agua de una garra que era llenada por inmersión en cada tanque, teniendo en cuenta que las plántulas se encuentran homogéneamente suspendidas en el agua gracias a su constante movimiento debido al sistema de aireación central. Se recolectaba finalmente una muestra aleatoria de 30 ejemplares que servía en el laboratorio para obtener una estimación del peso total de las algas del tanque así como de sus parámetros biométricos, obtenidos a partir de un pliego de herbario realizado con las mismas. Dichos pliegos fueron tratados con el programa Image-Pro Plus para realizar las distintas mediciones: ancho, largo y área total de los distintos ejemplares. Una vez que las plantas adquirieron un tamaño que permitía su extracción, escurrido y cálculo de peso total, se tomaba una muestra aleatoria de un 5% del peso total para los análisis biométricos en el laboratorio. Este porcentaje en peso era igual para que el número de ejemplares retirados en cada tanque y muestreo fuera siempre equivalente.

Para la estima de la tasa de crecimiento relativo en cada tanque se utilizó la ecuación de Hunt (1982) ya señalada en capítulos anteriores. La metodología de muestreo fue distintas en las dos experiencias realizadas. En la experiencia de 2013 se diseñó principalmente para la obtención de datos significativos de la tasa de crecimiento más que para obtener valores de producción neta; por lo que para evitar los problemas derivados de trabajar con distintas densidades de plantas, tras cada muestreo, se igualaba la biomasa de todos los tanques en función de la mínima obtenida en uno de ellos. En la

experiencia de 2014, con la idea de poder conocer la máxima capacidad de carga del sistema y densidad óptima de producción, en los muestreos se procedía a retirar de cada tanque un 5% en peso de las plantas para la realización de los estudios biométricos para no influir en las densidades que se iban obteniendo en cada tanque. Todos los análisis estadísticos fueron realizados con el paquete estadístico StatGraphics ® Centurion XV.

8-2.2.iv. Análisis elemental

Como en capítulos anteriores se realizó también un análisis del contenido en N y de la relación $\delta^{15}\text{N}$ de algunas de las muestras, que para ello fueron lavadas y posteriormente deshidratadas a temperatura ambiente. Estos análisis fueron realizados en el S.A.I (Servicio de Apoyo a la Investigación) de la Universidad de A Coruña, mediante combustión en un analizador elemental EA1108 unido a un espectrómetro de masas de relaciones isotópicas MAT253. Esto permite valorar las concentraciones de N (con lo que se puede obtener una estima fiable del contenido proteico multiplicando por el factor 6,25 (MAFF, 1975) y la relación $\delta^{15}\text{N}$ que nos indica la posible fuente de donde *Saccharina latissima* pudo obtenerlo. Valores negativos indican una fuente de síntesis química (el abono usado en el laboratorio para la producción de plántulas) y valores muy positivos indican nitrógeno de proveniencia orgánica de altos niveles tróficos.

8-2.3. Primera experiencia

8-2.3.i. Diseño de la experiencia

La primera experiencia se inició el 05/04/2013 y concluyó el 06/06/2013. Contó únicamente con tres tanques exteriores y un aporte de agua del efluente de 100 litros día suministrado de forma manual. Se intentó que el flujo fuera lo más lento posible para que las algas tuvieran tiempo suficiente de asimilar secuencialmente la mayor parte de los nutrientes, aunque dicho flujo también requiere un mínimo de caudal para evitar el taponamiento del sistema de conducción.

La experiencia se inició con un inóculo inicial en cada tanque de 20 gramos de plántulas de *Saccharina latissima* provenientes de la Planta de Cultivo de Algas del IEO en Santander y que fueron aclimatadas y precultivadas durante dos semanas en el Centro

de Investigación Mariñas de la Xunta de Galicia (CIMA) ubicado en Corón (Pontevedra). Las plantas eran de una media de 15 mm de largo por 5 mm de ancho. En cada muestreo se recolectaba una muestra aleatoria de cada tanque cuyos ejemplares eran preparados en un pliego de herbario para proceder después a su análisis biométrico y se igualaban los pesos en función del mínimo obtenido por tanque para que no hubiera variaciones en la densidad de cultivo de los tanques a lo largo de la experiencia.

Se realizaron 5 muestreos semanales hasta el 17/05/12 momento en el que las algas del tanque 3 se pusieron en el tanque 1 y viceversa. Esta inversión se realizó con la idea de reforzar y completar la información obtenida de las diferencias de crecimiento por falta de disponibilidad de nutrientes obtenidas en este sistema en serie.



Figura 8-12. Muestra de los ejemplares tras dos semanas del inicio de la primera experiencia.

8-2.3.ii. Resultados y discusión

Los resultados obtenidos se pueden tratar desde tres puntos de vista: las biometrías de cada uno de los grupos de plantas a intervalos de tiempo de cultivo de 7 días, el seguimiento de la evolución de la biomasa en cada tanque en esos mismos períodos y, finalmente, el estudio isotópico del nitrógeno a la par que del contenido total en N que nos permitirá conocer el grado de integración y el % proteico de los individuos.

8.2.3.ii.1 Estudio biométrico y tasas de crecimiento

En las figs. 8-13 a 8-15 se muestran los ejemplares de la 3ª semana de cultivo, los de la última antes de la inversión (5ª semana) y los del final de la experiencia (8ª semana):



Figura 8-13. Aspecto de las algas del tanque 1 (A), 2 (B) y 3 (C) tras 21 días de cultivo (26/04/13).



Figura 8-14. Aspecto de las algas del tanque 1 (A), 2 (B) y 3 (C) tras 42 días de cultivo (17/05/13).

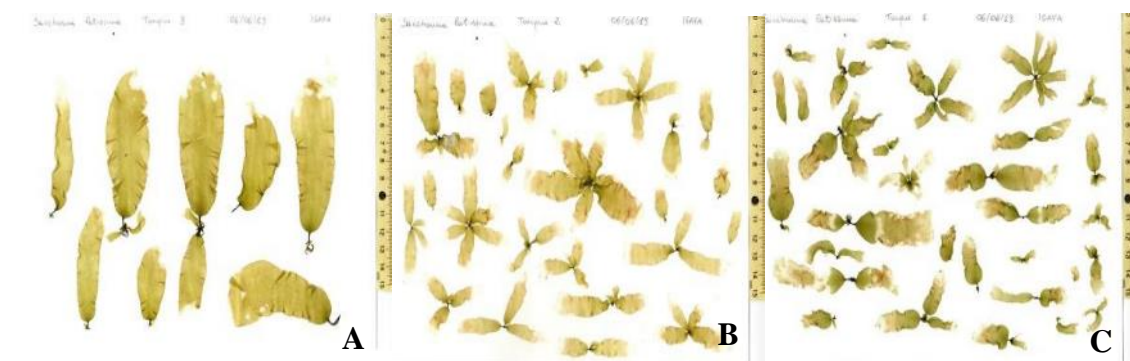


Figura 8-15. Aspecto de las algas del tanque 1 (A), 2 (B) y 3 (C) a los 63 días de cultivo (06/06/13), tras 20 días de inversión de las algas del tanque 3 al 1 y viceversa.

Se puede observar en la tab. 8-8 y en la fig. 8-16, al igual que se refleja en las imágenes anteriores, el mayor crecimiento fue en las algas del T1, sin duda por el aporte directo de nutrientes procedentes de los peces que se les ofrece a las mismas, nutrientes que parece ser secuestrados casi en su totalidad en dicho tanque visto el desarrollo de los ejemplares de los tanques consecutivos. Se se observa también lo ocurrido en la inversión del T1 al T3 y viceversa a partir del 17/05/13, con un claro remonte de las algas del T3 en su nueva

ubicación, lote que, como se observa al final de la experiencia, consigue retomar el crecimiento pese a las altas temperaturas.

FECHA	Tanque 1		Tanque 2		Tanque 3	
	Largo	Ancho	Largo	Ancho	Largo	Ancho
05/04/13	14,9	5,4	14,9	5,4	14,9	5,4
19/04/13	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D
26/04/13	34,4	17,9	27,5	11	19,5	9,4
03/05/13	45,3	20	30,3	12,8	27,5	10,8
10/05/13	46,1	20,8	33,2	13	28,5	12,6
17/05/13	61,1	24	30,1	12,4	29,3	11,6
Inversión algas Tanque 1 a Tanque 3 y viceversa						
24/05/13	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D
30/05/13	45,1	19,3	37,8	14,2	36,2	12,5
06/06/13	63,3	22,8	29,5	11	32,8	11,7

Tabla 8-8. Datos biométricos medios de los 30 ejemplares mayores de cada tanque en cada fecha de muestreo. A partir del 17/05/13 las algas del tanque 3 se pusieron en el tanque 1 y viceversa.

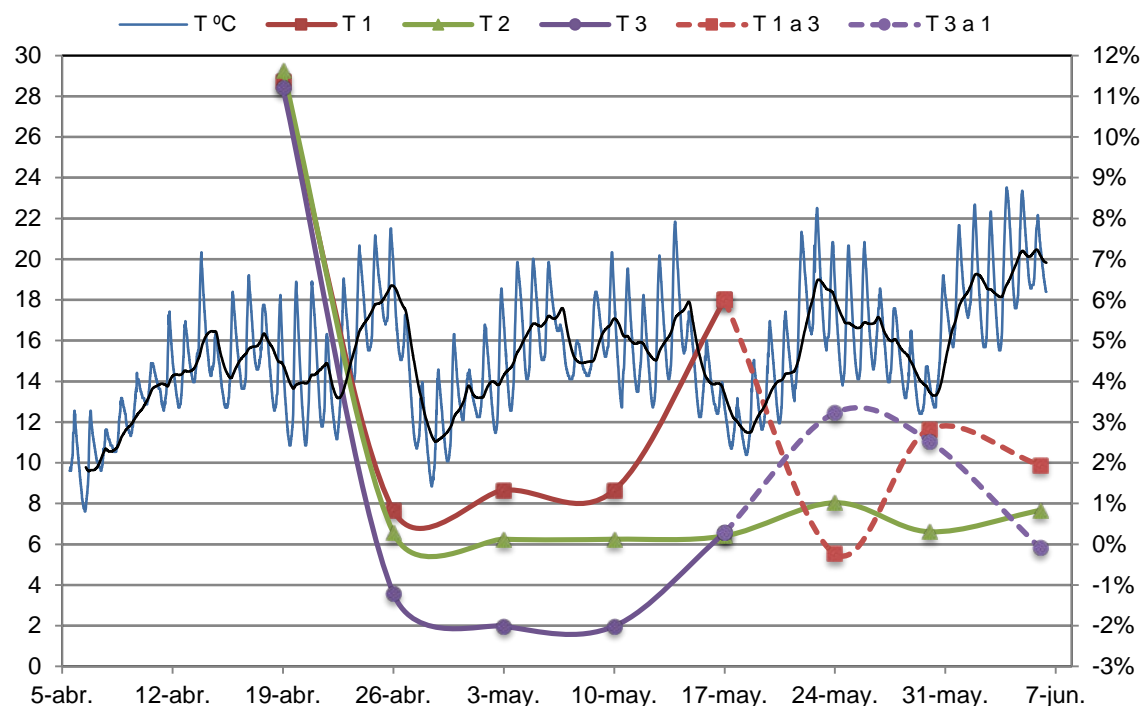


Figura 8-16. Representación gráfica de las tasas de crecimiento relativo (% día) de las algas de los tres tanques conjuntamente con la evolución de la temperatura del agua (° C). Las líneas discontinuas representan las tasas de crecimiento de las algas de los tanques 1 y 3 después de la inversión realizada el 17/05/2013.

En primera instancia se percibe una graduación en las tasas de crecimiento de las algas de los tres tanques, teniendo siempre las del T1 tasas positivas, las del T2 cercanas a cero y las del T3 siempre negativas. Estas tasas de crecimiento tan bajas o negativas son consecuencia directa de un exceso de luz y temperatura, dado que *Saccharina latissima* es en nuestras latitudes una especie de desarrollo principalmente invernal sometida a días cortos y temperaturas de unos 14° C, siendo normalmente letales temperaturas superiores a los 17° C y más con estrés lumínico (Gerard et al, 1987).

A pesar de las malas condiciones del cultivo por lo tardío de la época y las condiciones estresantes de exceso de luz y altas temperaturas es sorprendente cómo en el T1 las tasas de crecimiento se mantuvieron razonablemente altas, y esto sólo se puede explicar por el efecto compensador del estrés que debido a los nutrientes de fácil asimilación, efecto ya señalado anteriormente por Gerard (1997b). Por otra parte estudios recientes de transcriptómica llevados a cabo en *S. latissima* reflejan la capacidad que tiene esta especie para mitigar los daños de la aceleración de metabolismo que produce el efecto sinérgico entre luz y temperatura reduciendo o aumentando ciertas rutas metabólicas encaminadas al aprovechamiento de los nutrientes existentes en el medio (Heinrich *et al.*, 2012). Este efecto compensador queda claramente de manifiesto al analizar el comportamiento de las algas del T1 y T3 al intercambiarlos de posición (líneas discontinuas en la fig. 8-16). Tras esta inversión, que coincidió con un fuerte aumento de la temperatura, las algas procedentes del T3, al pasar al tanque de cabecera, incrementaron su tasa de crecimiento, mientras que las algas del T1 al pasar al tanque de cola disminuyeron fuertemente su tasa de crecimiento llegando incluso a valores negativos, posteriormente ambos grupos de plantas recuperaron o mantuvieron su crecimiento por una bajada temporal de la temperatura para finalmente volver a decaer por el aumento de la misma, momento en que concluyó el experimento.

8.2.3.ii.2 Composición química de las algas (análisis isotópico)

Se realizó también un análisis del contenido en proteínas y de la relación $\delta^{15}\text{N}$ de las muestras obtenidas cada dos semanas. En las figs. 8-17 y 8-18 se muestra la evolución de estos parámetros. Como cabría esperar las muestras del T1 son la que sin ninguna duda están captando la mayor parte de las moléculas ricas en nitrógeno y convirtiéndolo en

proteínas, esto explica que tengan a la vez un mayor contenido proteico y valor de la $\delta^{15}\text{N}$. Esta hipótesis se corrobora al ver las consecuencias de la inversión de las algas de los tanques T1 y T3 el 17/05.

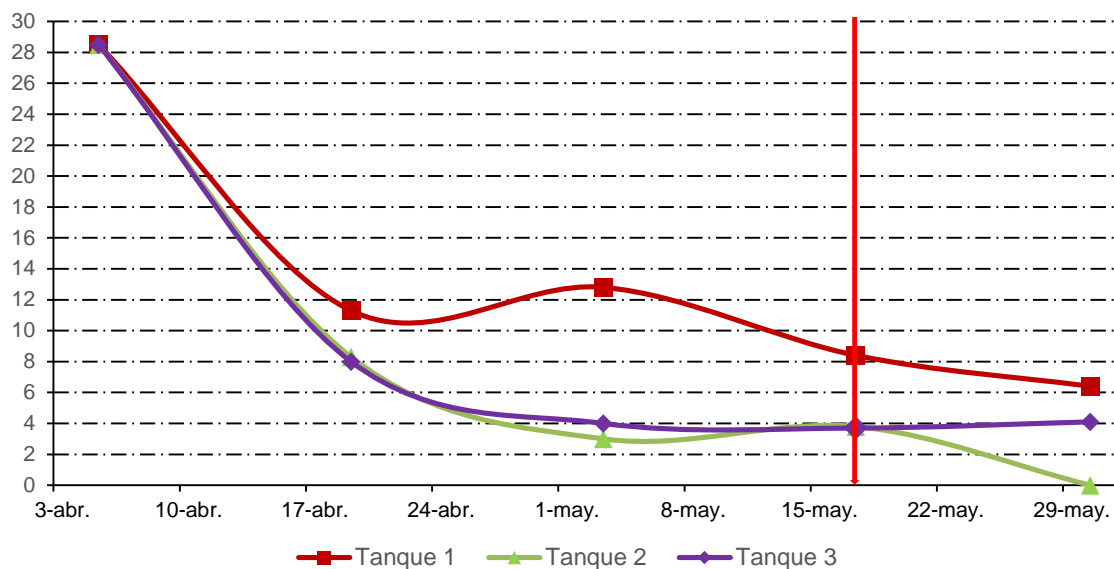


Figura 8-17. Porcentaje en proteínas de las algas de los tres tanques en los distintos muestreos. La flecha roja representa la inversión de las algas del tanque 1 al 3 y viceversa.

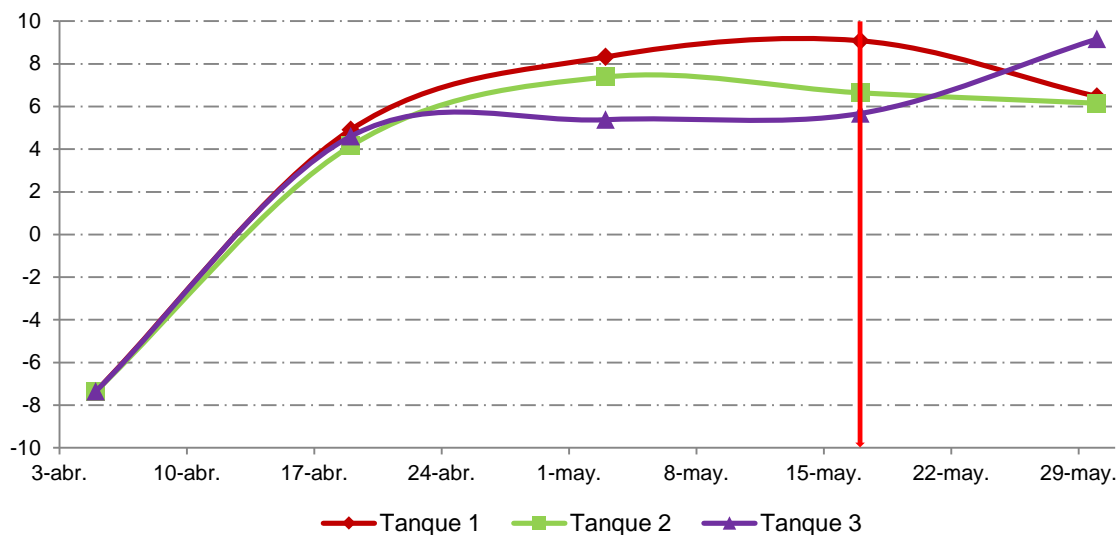


Figura 8-18. Relación $\delta^{15}\text{N}$ de las algas de los tres tanques en los distintos muestreos. La flecha roja representa la inversión de las algas del tanque 1 al 3 y viceversa.

8-2.4. Segunda experiencia

8-2.4.i. Diseño de la experiencia

Durante el período del 05/02/2014 al 15/05/2014 se realizaron nuevos ensayos de cultivo en serie en las mismas instalaciones pero con ciertas mejoras, principalmente la incorporación de un nuevo tanque a la serie y, por otro, el suministro automático del efluente de los peces a la línea de cultivo. Además estos ensayos, al menos el primero de ellos se pudieron realizar en un período de tiempo más acorde con el desarrollo natural de *Saccharina latissima*. Los ensayos constaron de dos ciclos consecutivos de cultivo. El primero comenzó el 5 de febrero de 2014 con el cultivo en los 4 tanques de una biomasa inicial de 40 g de plántulas de *S. latissima* de talla pequeña: 14,9 mm de largo, 5,2 mm de ancho y un peso medio aproximado de 0,012 g. Estas plantas, como en experiencias anteriores, fueron producidas en la Planta de Cultivo de Algas de IEO en Santander.

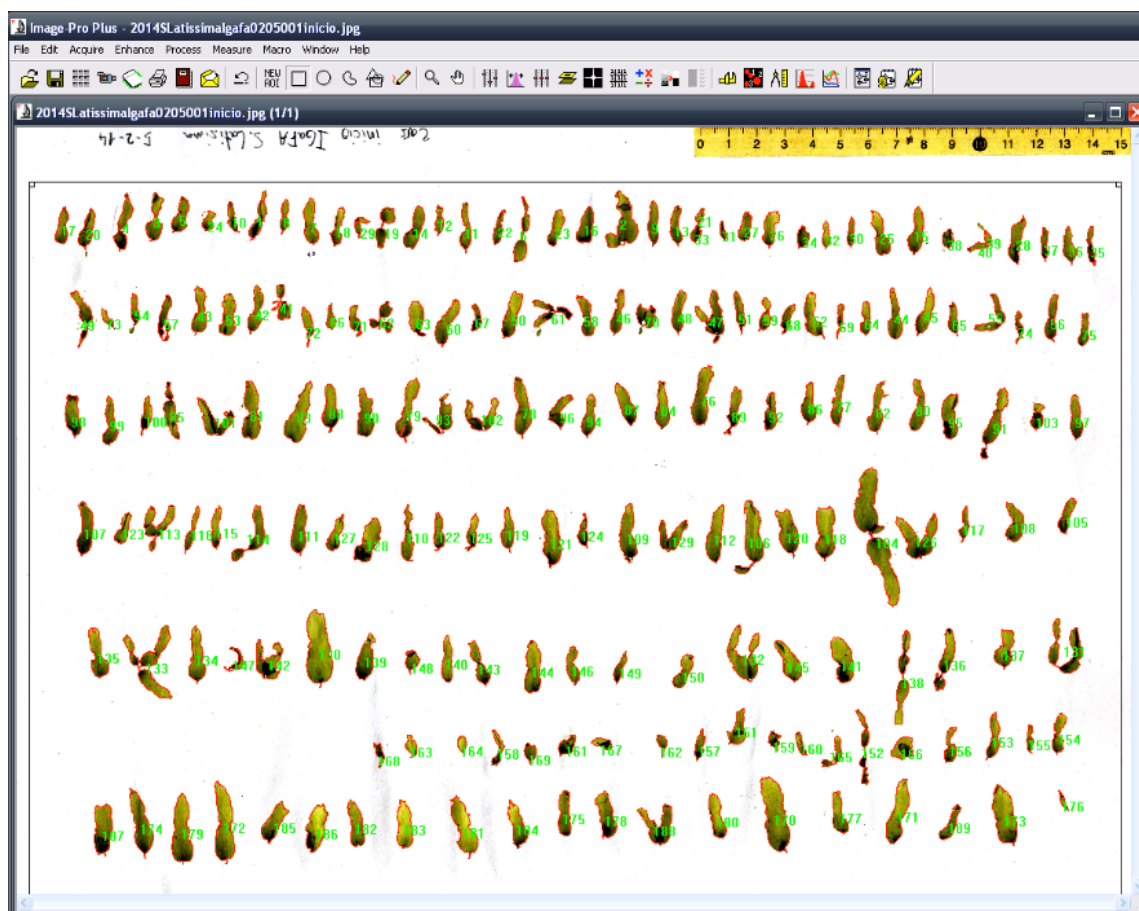


Figura 8-19. Imagen de la muestra de las plántulas al comienzo del primer ensayo de la segunda experiencia tratada con el programa Image-Pro Plus para la realización de las distintas biometrías.

El flujo de bombeo del agua del efluente fue en el primer ensayo de 600 l/día repartidos en 5 tomas en las horas de mayor actividad fotosintética, siendo el flujo final de entrada a los tanques regulado por la válvula del depósito exterior de 1 l/min. Este pequeño flujo se estableció con la idea de conseguir como en la experiencia anterior un gradiente de crecimiento entre los tanques a lo largo del tiempo por limitación de nutrientes. Este ensayo se llevó a cabo hasta el 02/04/2014, momento en el que en el primer tanque, el de mayor desarrollo, la producción neta semanal empezó a disminuir, síntoma claro de haber llegado a la densidad máxima de cultivo, por lo que se procedió a realizar una nuevo ensayo utilizando para ello únicamente los ejemplares de este primer tanque.



Figura 8-20. Ejemplares representativos del inicio del segundo ensayo de la segunda experiencia.

El segundo ensayo comenzó por lo tanto ese mismo día y con una biomasa inicial por tanque de 750 g de plántulas proveniente del T1, que era el tanque donde presentaban el mayor tamaño y tenían mejor aspecto. Las plántulas al inicio del mismo tenían unos

valores medios de 133 mm de largo, 65 mm de ancho y un peso aproximado de 2 g (fig. 8-20). Dado que la biomasa inicial era mucho mayor que en la primera experiencia se triplicó el caudal del efluente a 1800 l/día, con la idea también de trabajar con una menor limitación de nutrientes ya que como se verá en los resultados obtenidos en el primer ensayo los nutrientes contenidos en tan poco caudal a las pocas semanas de su inicio eran biofiltrados casi en su totalidad en el primero de los tanques. Este nuevo ensayo se extendió hasta el 15/05/2014

Uno de los principales objetivos de estos ensayos era conocer la capacidad de carga del sistema y la densidad óptima de producción, por lo que tras los muestreos para no influir en las densidades que se iban obteniendo en cada tanque se procedía a retirar de cada uno de ellos únicamente un 5% en peso de las plantas para la realización de los estudios biométricos.

8-2.4.ii. Resultados y discusión

8.2.4.ii.1 Evolución de los parámetros ambientales

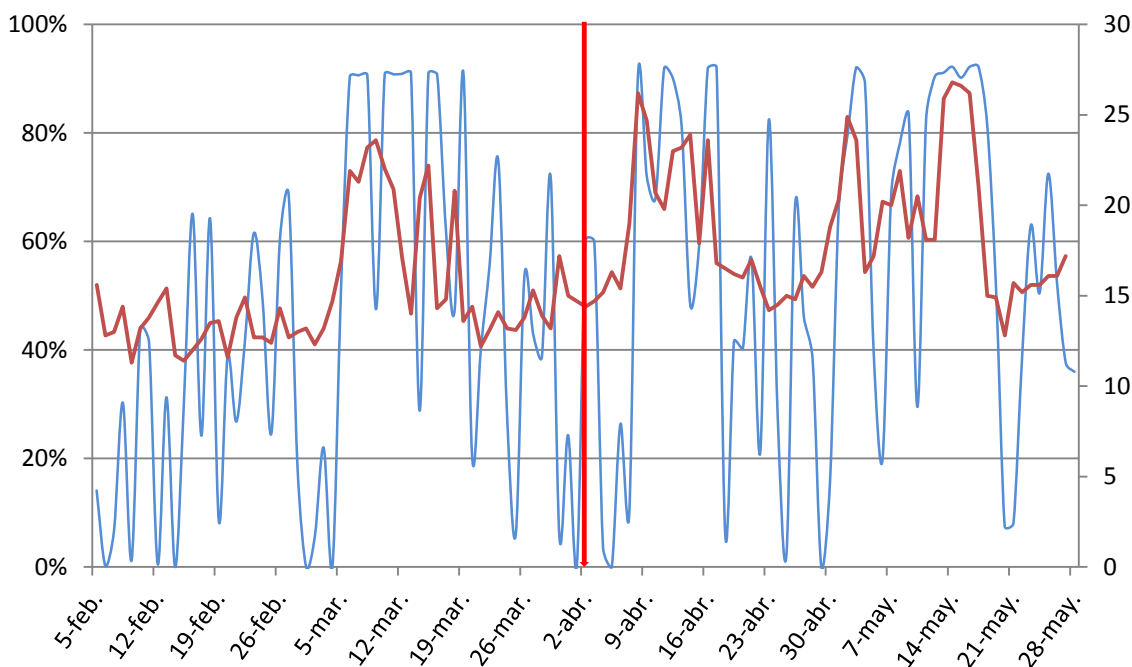


Figura 8-21. Porcentaje de insolación y temperatura máxima diaria (° C) durante la segunda experiencia (datos de la estación meteorológica de Corón). La línea roja vertical indica el comienzo del segundo ensayo.

Como se puede observar en la fig. 8-21 las mejores condiciones para el cultivo se dieron en el primer ensayo, hasta la quinta semana, más adelante se observan numerosos picos de altas temperaturas e insolación, picos que sin duda hicieron mella en el crecimiento de las algas como se verá en los resultados del segundo ensayo. Las temperaturas altas siempre van asociadas a picos altos de insolación, pero los picos bajos de insolación no tienen por qué ir asociados a bajas temperaturas.

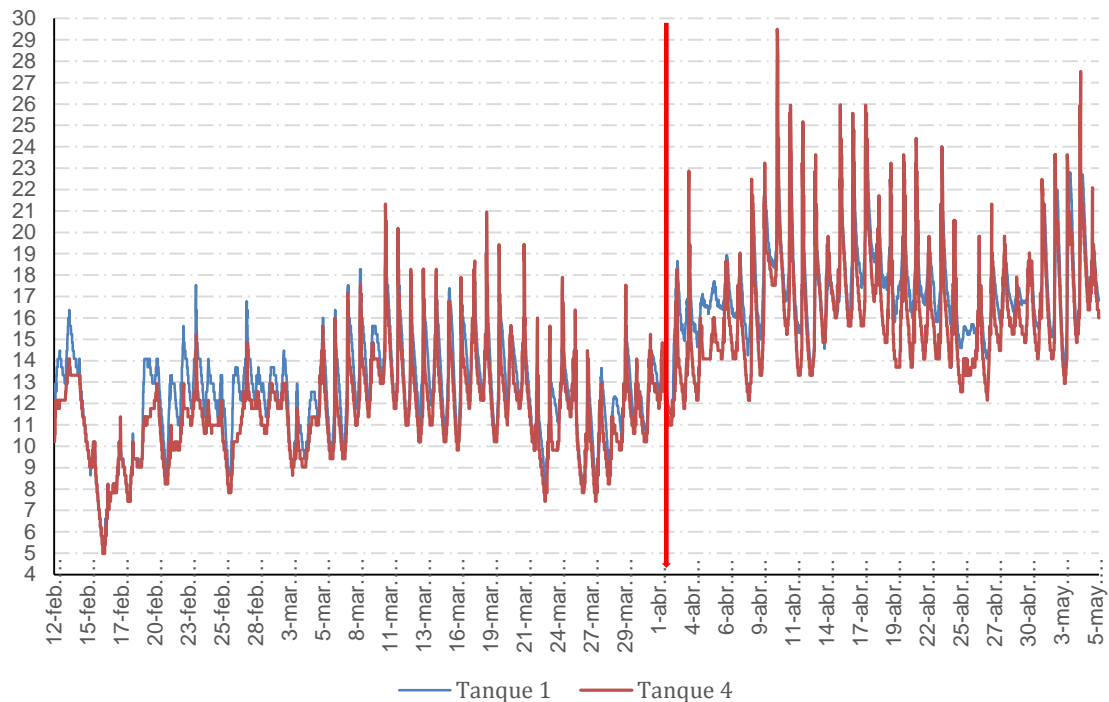


Figura 8-22. Evolución de la temperatura (° C) en los tanques T1 y T4 durante la segunda experiencia. La línea roja vertical indica el comienzo del segundo ensayo.

Como se puede observar en la fig. 8-22 en el primer ensayo apenas se aprecian diferencias entre las temperaturas del T1 y T4. En líneas generales la temperatura en este primer ensayo se mantuvo por debajo de los 17° C, temperatura crítica para el desarrollo de esta especie. Sin embargo se observa claramente cómo durante el segundo ensayo las temperaturas fueron considerablemente más altas, llegando incluso puntualmente a valores muy cercanos a los 30° C.

Junto con la intensidad lumínica y la temperatura otras variables ambientales que pueden influir en el desarrollo de las algas en los tanques son las variaciones en dos parámetros del agua muy relacionados: el pH y la reserva alcalina.

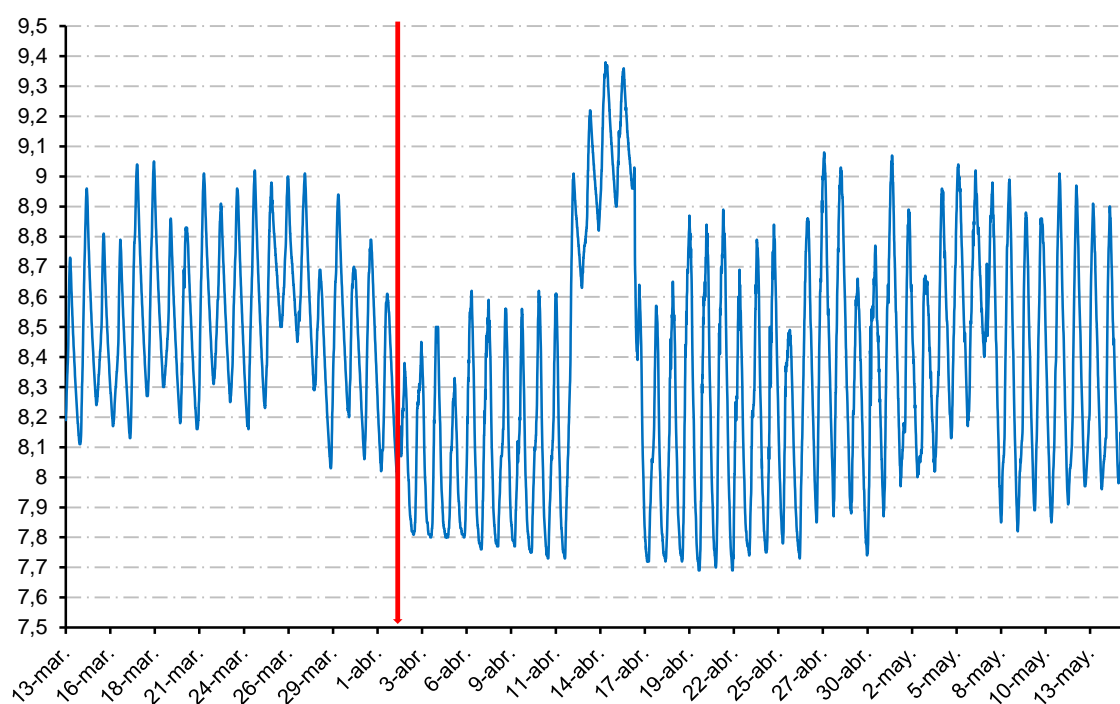


Figura 8-23 Evolución del pH en el T1 desde el final de primer ensayo hasta la conclusión de la segunda experiencia. La línea roja vertical indica el comienzo del segundo ensayo.

Como se puede comprobar en la fig. 8-23 el parámetro pH sigue, al igual que la temperatura, ritmos diarios debido al consumo de CO_2 debido a la actividad fotosintética de las algas. En el primer ensayo los valores de pH se encuentran dentro de lo normal, en torno al 8,5, siendo muy pocos los días y momentos en que se superó el valor de 9, valor que si se mantiene puede resultar crítico para la viabilidad de la especie. No se controló el pH en las primeras semanas de las experiencias debido a que se consideró la biomasa insignificante para estos primeros estadios aunque, sorprendentemente, desde el primer registro ya se aprecian notables fluctuaciones diarias de este parámetro. En el segundo ensayo el registro de estos valores se realizó de comienzo a fin debido sobre todo a la ya importante biomasa inicial de 750 g que sí podría acarrear oscilaciones importantes de este parámetro, aunque se debe recordar que el régimen de flujo de agua en esta segunda experiencia fue muy superior lo que también pudo ayudar a estabilizarlo.

Se aprecia que al inicio de la segunda experiencia el aporte mayor de efluente consigue disminuir la amplitud de los picos diarios de pH a 0,5 puntos. A medida que las algas aumentan su biomasa la amplitud crece a cerca de 1,0 punto, que rara vez se sobrepasa gracias a la capacidad tampón del agua de mar. La importancia de la renovación de agua

del sistema es clara, sobre todo si observamos las importantes consecuencias que sobre el pH tuvo el corte accidental del suministro de agua que por una avería en la bomba sufrió el sistema durante 4 días consecutivos. En este incidente puntual se observaron igualmente ritmos día-noche en valores de pH, pero en unos rangos mucho más elevados.

La reserva alcalina se empezó a registrar también a partir de las últimas semanas del primer ensayo, y siempre presentó valores muy similares tanto en el efluente como en los cuatro tanques, indicando que el C inorgánico disponible por las plantas (principalmente CO_3H^-) en ningún momento fue un factor limitante para su crecimiento. La avería puntual de la bomba de suministro durante cuatro días sirvió también para la testar el funcionamiento de la medición de esta reserva, al comprobar que en esas fechas los valores de CO_2 liberados en el laboratorio por las muestras de agua de los tanques estuvieron 23 ppm por debajo de los del efluente. En el resto de la experiencia la diferencia obtenida en la concentración de CO_2 en los tanques respecto al efluente nunca supero las 8 ppm y la diferencia media se encuentra aproximadamente en 3 ppm.

8.2.4.ii.2 Evolución de la biomasa y de los parámetros biométricos

Como primer parámetro se ofrece en las figs. 8-24 y 8-25 la biomasa total acumulada semana tras semana en los tanques durante ambos ensayos.

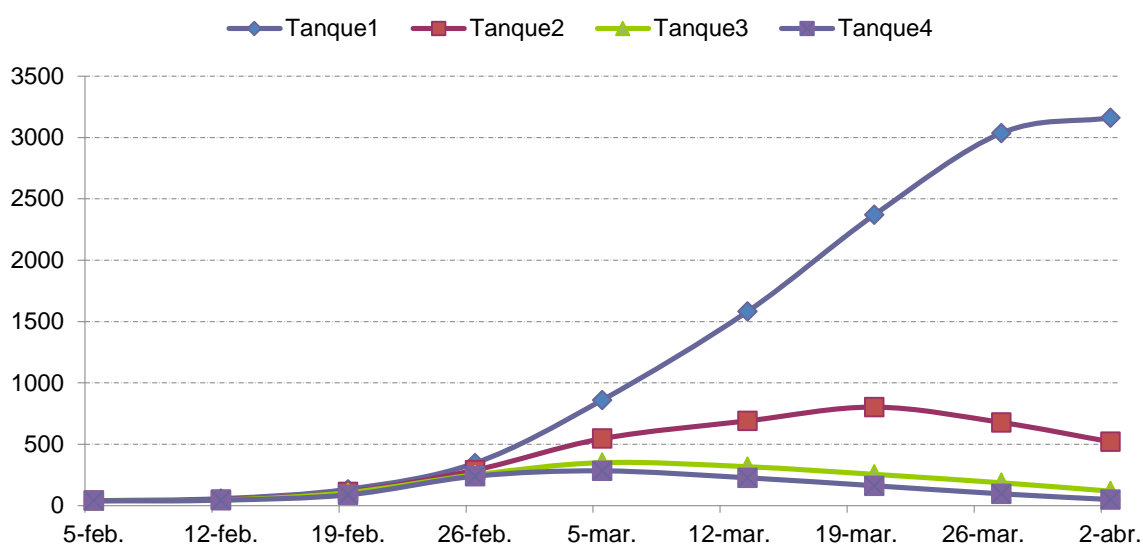


Figura 8-24. Evolución de la biomasa (g) de los tanques a lo largo del primer ensayo de la segunda experiencia

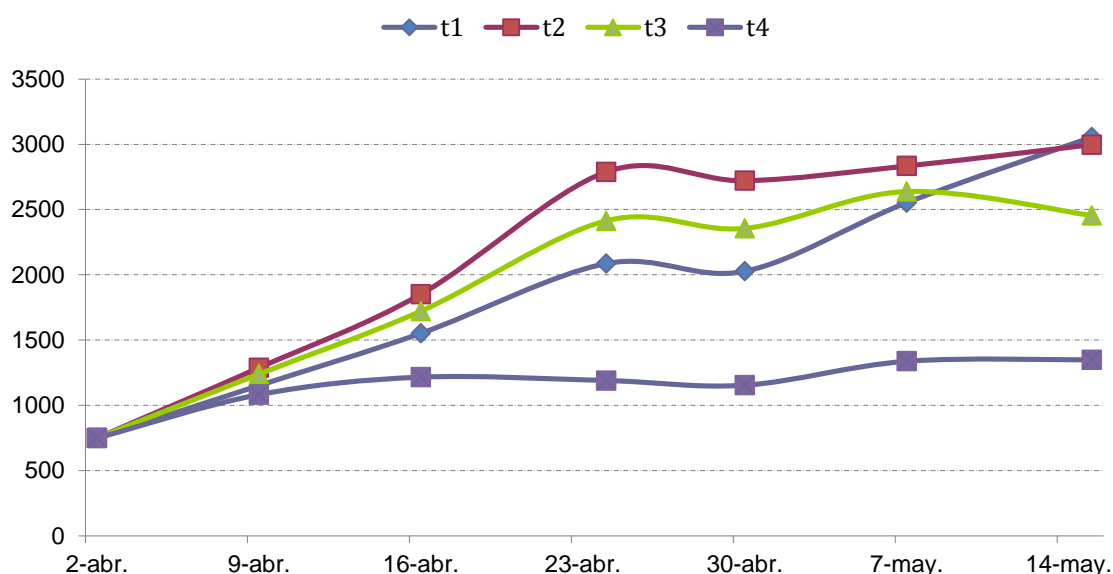


Figura 8-25. Evolución de la biomasa (g) de los tanques a lo largo del segundo ensayo de la segunda experiencia.

En el primer ensayo se aprecia un rápido despunte de la biomasa del T1, lo que significa la retención en ese tanque de gran parte de los nutrientes aportados al sistema. El T2 aún presenta un moderado crecimiento sobre todo las primeras semanas, mientras que los tanques T3 y T4 claramente son deficitarios en nutrientes prácticamente desde el comienzo del ensayo (fig. 8-24). Por lo que respecta al segundo ensayo, en el que el flujo de agua fue significativamente mayor, se aprecia que los crecimientos son más parejos, quedando claramente descolgado de los demás el T4 (fig. 8-25). Curiosamente en las primeras semanas de este segundo ensayo tuvieron mejor comportamiento los tanques T2 y T3 que el T1, lo que se podría explicar por el mayor estrés térmico sufrido por las algas del T1 debido a la alta temperatura del efluente y el considerable aumento de flujo que se le ha impuesto pasándolo a un total de 1800 l/día, ya que el agua que procede de la planta de peces en general tiene una temperatura cercana a los 20° C. Finalmente, llegando al límite de carga, que corresponde en esta experiencia a unos 3000 g/tanque (fig. 8-25, unos 12 kg/m³), y sin duda por la aparición de los primeros síntomas de déficit de nutrientes, la tasa de crecimiento de las algas del T1 es la máxima, recuperando el terreno perdido.

Otra forma de estudiar la evolución del cultivo es mediante el análisis del crecimiento neto semanal y la tasa de crecimiento día. El primero es la producción semanal de biomasa neta (cosecha) y la segunda el porcentaje de incremento de biomasa del cultivo en 24

horas. En las figs. 8-26 y 8-27 se ofrece la evolución de ambas variables en los distintos tanques a lo largo de los dos ensayos.

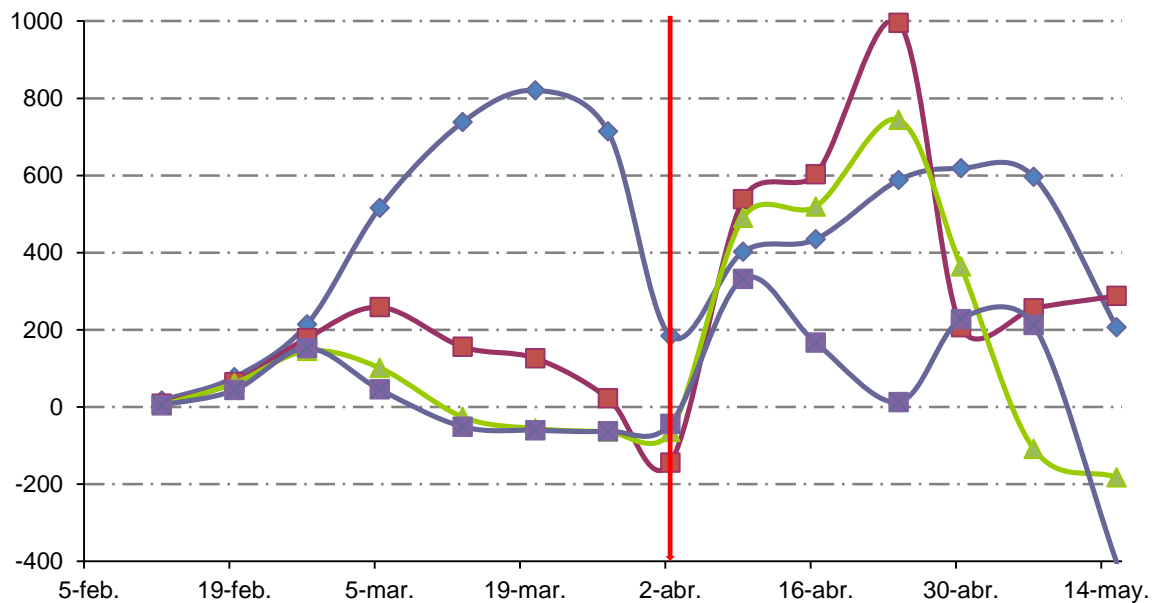


Figura 8-26. Evolución del crecimiento neto semanal (g) en los tanques a lo largo de los dos ensayos. La flecha roja indica el comienzo del segundo ensayo.

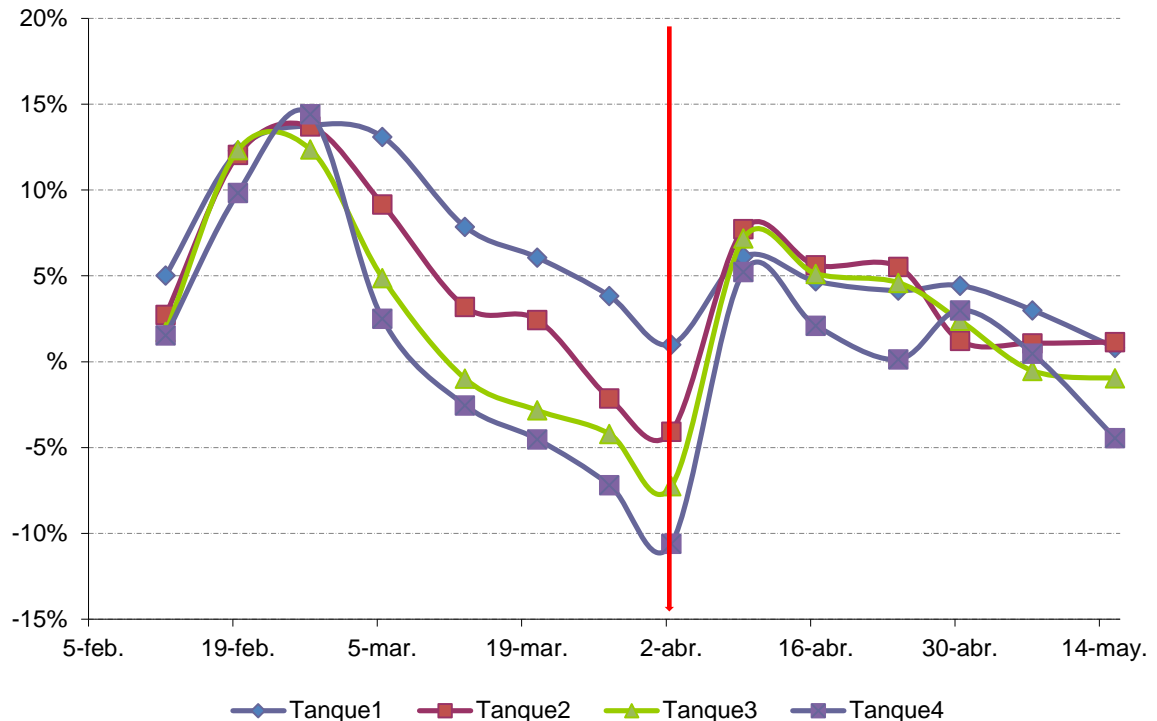


Figura 8-27. Evolución de la tasa de crecimiento de las algas (% día) en los tanques a lo largo de los dos ensayos. La flecha roja indica el comienzo del segundo ensayo.

Este tipo de representaciones son muy útiles para analizar la densidad óptima de cultivo en vistas a obtener el máximo de producción. Se podría así mantener la densidad de máxima producción de biomasa, que no tiene por qué coincidir con la máxima densidad de cultivo o de tasa de crecimiento. Obsérvese por ejemplo que el pico de tasa máxima de crecimiento (14,5%) para el primer ensayo se da en el T1 el 26 de febrero (fig. 8-27), con una densidad inicial (la semana previa) de 133,5 g (fig. 8-24) y producción semanal de 214 g (fig. 8-26); mientras que el pico de máxima biomasa producida semanalmente (820 g) se da el 19 de marzo también en el T1 (fig. 8-26) con una tasa de crecimiento del 6% (fig. 8-27) y una densidad inicial (la semana previa) de 1.581 g (fig. 8-24), lo que viene a decir que la densidad óptima de cultivo desde el punto de vista productivo es de unos 6 kg/m³.

En las figs. 8-26 y 8-27 se muestran las gráficas de los dos ensayos juntos para apreciar mejor el nuevo arranque que se obtiene en crecimiento al repartir al comienzo del segundo ensayo los 3.000 g de *Saccharina latissima* del T1 entre los 4 tanques. Pasando en una semana de un crecimiento del 1% al final del primer ensayo a un pico de casi un 7% en todos los tanques, crecimiento que poco a poco se van normalizando hasta llegar de nuevo a tasas cercanas al 1% (fig. 8-27) cuando la biomasa vuelve a alcanzar cifras cercanas a los 3.000 g/tanque (fig. 8-25).

Es de destacar que las tasas de crecimiento en condiciones óptimas están en función del tamaño de las plántulas. Mientras que las del primer ensayo (14,9 x 5,2 mm) llegan a unas tasas de crecimiento óptimo cercanas al 15%, las del segundo (133 mm x 65 mm) no superan el 7%. Este hecho no es extraño debido a que la complejidad de los tejidos va en aumento y, por ello, la relación superficie/volumen de las plantas, o lo que es lo mismo, la proporción de tejidos fotosintéticos va disminuyendo paulatinamente. Este hecho es de vital importancia a la hora de una futura programación u optimización del cultivo en función de las necesidades de biofiltración o de la utilización de la biomasa obtenida.

En cuanto a los parámetros biométricos de las plántulas en la fig. 8-28 se representan en diagramas de cajas agrupados los valores de los pesos de las plántulas respecto a tanque y fecha en el primer ensayo.

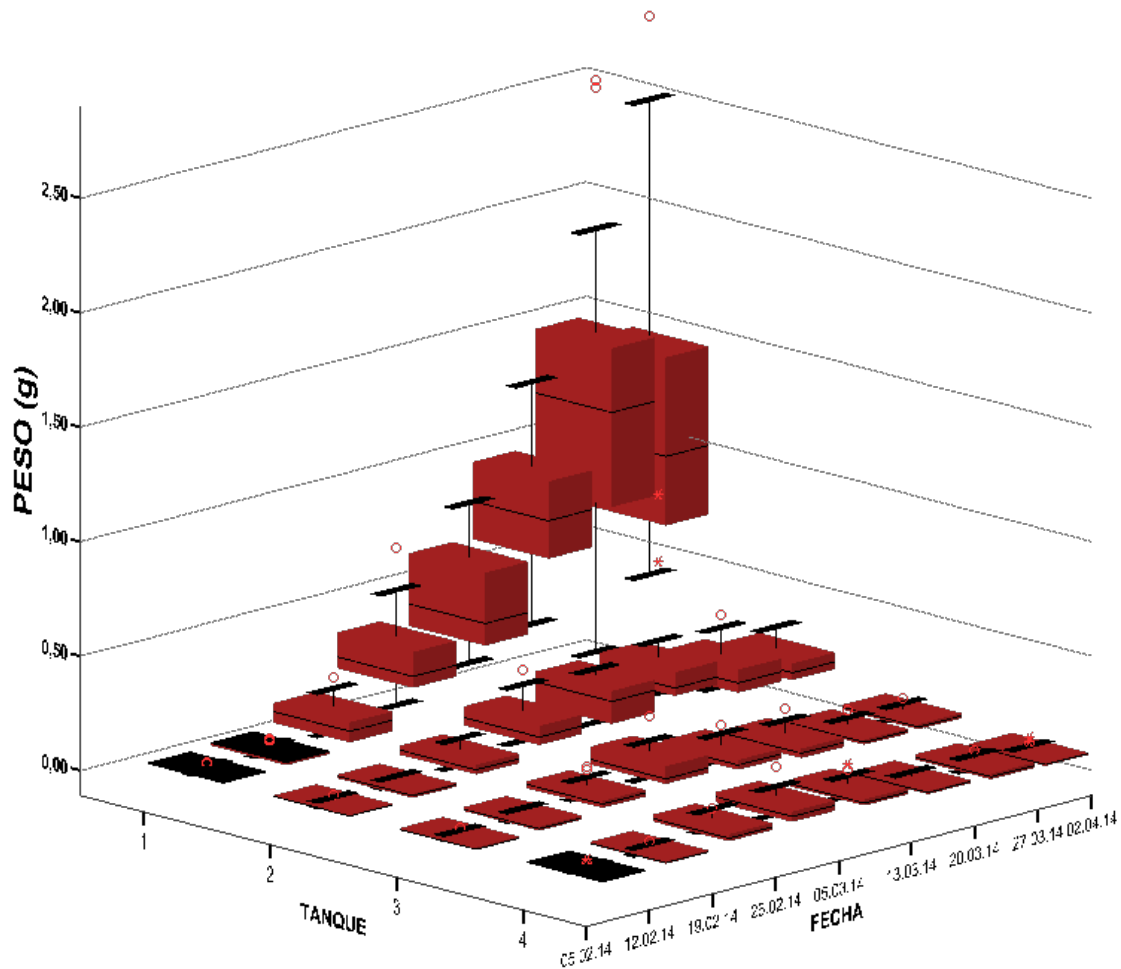


Figura 8-28. Evolución del peso de las plántulas en función del tanque y fecha en el primer ensayo de la segunda experiencia.

En esta figura se observa que como pasaba con las tasas de crecimiento hay una gran diferencia de peso de las plantas del T1 respecto a la de los siguientes. Se aprecia también cómo los mayores pesos de los ejemplares se obtuvieron en los distintos tanques más tempranamente a medida que se avanza del T1 al T4, o lo que es lo mismo, que los ejemplares empezaron a degradarse antes cuanto más lejos están en la serie del tanque de cabecera. Esto indica, además, que aun aumentando la biomasa de algunos tanques los tamaños medios de las plantas descenden, hecho que se puede explicar por el aumento de la amplitud de los rangos de pesos. A medida que madura el cultivo los ejemplares presentan pesos más dispares y son los más grandes los que contribuyen en mayor medida a la biomasa total del tanque, con lo que se siguen obteniendo tasas de crecimiento positivas aunque la media de los ejemplares disminuya. Un comportamiento similar se encuentra en los demás parámetro biométricos como el área, largo y ancho de las láminas.

Aunque aquí no se muestra los estudios de regresión lineal relacionando peso con las otras variables biométricas indican que la más representativa, con una r cercana al 0,95, es la variable área. Este dato es interesantes de cara a futuros estudios morfológicos de plantas en cultivo, puesto que la relación peso superficie nos puede servir también como un indicador de su estado fisiológico.

En la fig. 8-29 se representan en diagramas de cajas agrupados los valores de los pesos de las plántulas respecto a tanque y fecha en el segundo ensayo.

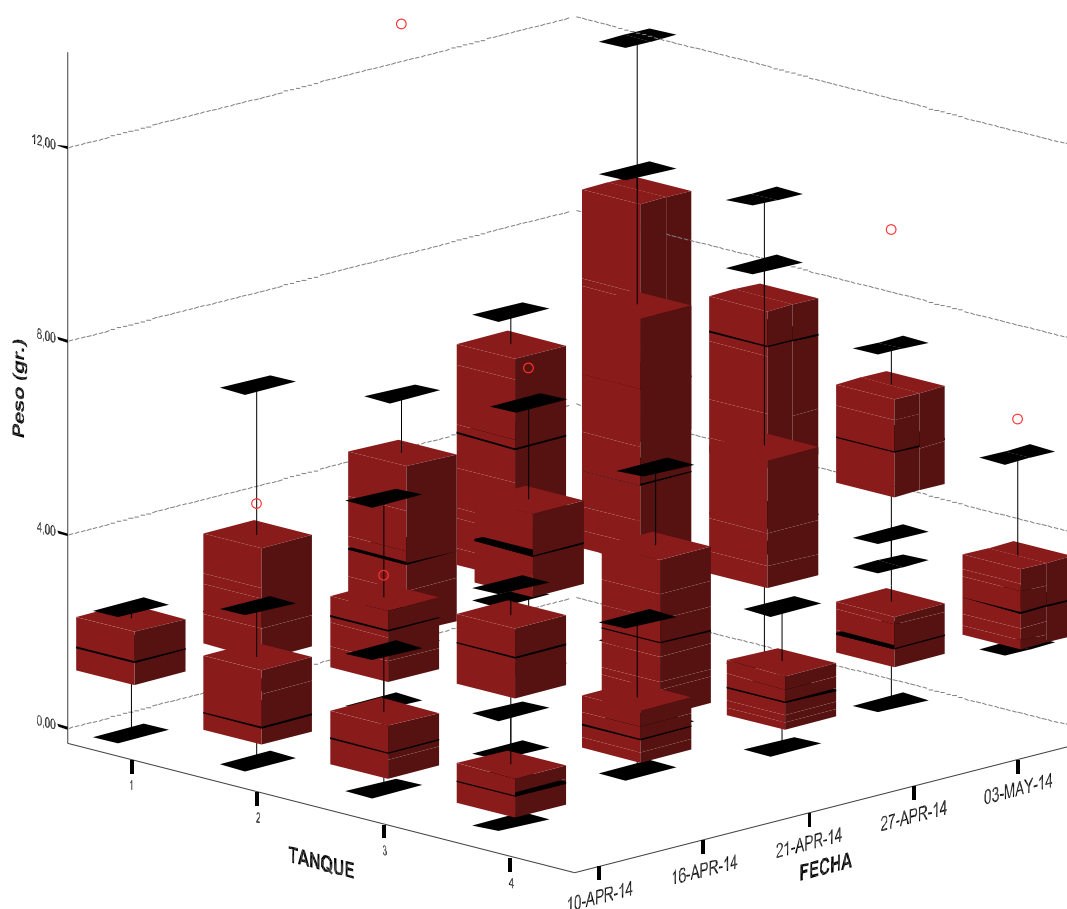


Figura 8-29. Evolución del peso de las plántulas en función del tanque y fecha en el segundo ensayo de la segunda experiencia.

En esta gráfica se observa principalmente la ausencia de heterogeneidad en las poblaciones de los 4 tanques, apareciendo según los estadísticos solo en la parte final de la experiencia, donde el peso de las plantas del T4 es significativamente menor que en los otros tres. Estas menores diferencias entre tanques sin duda son debidas a una suma de causas. Por un lado, el mayor flujo de agua y menor tasa general de crecimiento de las plantas por su mayor tamaño y, por otro, el mayor estrés general debido a las altas

temperaturas. La escala de la experiencia no permitió llevar a cabo un cultivo más longevo en el que se fueran acrecentando las diferencias entre tanques ya que en la 5ª semana de cultivo ya se sobrepasó el límite de carga de 12 kg/m^3 , límite que se pudo establecer en la experiencia anterior.

8.2.4.ii.3 Composición química de las algas

El análisis de la composición en nitrógeno de las algas permiten explicar mejor algunas de las variaciones biométricas observadas en las distintas experiencias y ayudan a conocer el proceso de la biofiltración y el valor comercial de la biomasa obtenida, sobre todo en lo que se refiere a su contenido proteico (fig. 8-30), valor que se obtiene de forma indirecta multiplicando el contenido en nitrógeno por 6,25 (MAFF, 1975). Las fechas escogidas para realizar los análisis fueron a las 3 semanas de empezar el primer ensayo (en el momento de mayor tasa de crecimiento), al final de la misma; al comienzo del segundo ensayo (también en el momento de mayor tasa) y en su final.

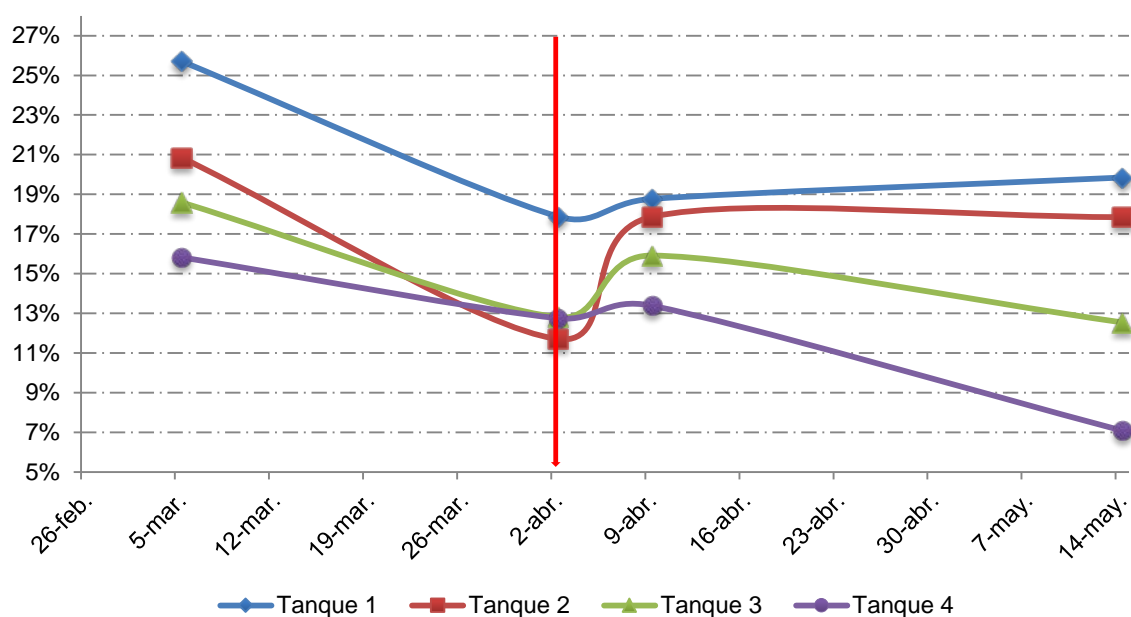


Figura 8-30. Porcentaje de proteínas de las algas de los 4 tanques en las fechas seleccionadas de los dos ensayos de la segunda experiencia. La flecha roja indica el comienzo del segundo ensayo.

Se aprecia una vez más el despunte de las algas del primer tanque respecto a las de los siguientes. Estas algas tienen un contenido proteico inicial de cerca del 26%, lo que prácticamente triplica los datos que para esta especie se pueden encontrar en la

bibliografía. Dicha diferencia, aunque con valores menos abultados, se sigue dando en todo el desarrollo del cultivo. Un dato interesante es el obtenido tras el desdoblamiento de la biomasa previo al comienzo del segundo ensayo (flecha roja); en tan solo una semana su 17% de proteínas, por el simple hecho de traslocarlos a los restantes tanques, empiezan a perderlo paulatinamente en el T3 y T4. En tan solo 5 semanas el contenido proteico de los ejemplares del T4 desciende a menos de la mitad.

Las variaciones de la relación isotópica $\delta^{15}\text{N}$ en esta segunda experiencia son difíciles de explicar ya que curiosamente, y en líneas generales, aumentan en el sentido inverso al esperado, siendo mayor en los tanques T3 y T4 que en los T1 y T2, que son los que reciben más directamente el efluente (tab. 8-9). Este inexplicable efecto, que no ocurrió en la primera experiencia (quizá por el pequeño caudal de entrada de efluente) ya fue señalado anteriormente en experiencias “outdoor” en las que, paradójicamente, el aumento de la relación $\delta^{15}\text{N}$ en las algas bañadas por el efluente de una planta de cultivo de peces en tierra sólo se hace evidente a cierta distancia del punto de vertido (Carballeira et al., 2013), estos autores discuten que quizá la explicación del fenómeno sea la influencia del bajo pH de los efluentes de peces o a fenómenos de oxidación del NH_3^- a NO_3^- debidos a las bacterias. Otra posible explicación sería la naturaleza del nitrógeno del pienso utilizado para alimentar a los peces, pero lamentablemente no se tuvo la previsión de realizar su analítica.

<i>Fecha</i>	<i>Tanque1</i>	<i>Tanque2</i>	<i>Tanque3</i>	<i>Tanque4</i>
05/03/14	4,6	5,1	6,0	7,2
02/04/14	5,4	6,5	7,1	7,4
09/04/14	3,6	3,8	4,6	5,8
15/05/14	4,1	5,4	6,8	7,5

Tabla 8-9. Valores de la relación $\delta^{15}\text{N}$ obtenidos en los diferentes tanques (‰).

8.2.4.ii.4 *Química del agua*

Finalmente otro de los objetivos de esta segunda experiencia fue el estudio de la evolución de los nutrientes fundamentales (nitratos y fosfatos) y la capacidad de biofiltración de los mismos por parte de las algas. En la fig. 8-31 se representan las concentraciones entrantes y salientes en el sistema durante el primer ensayo.

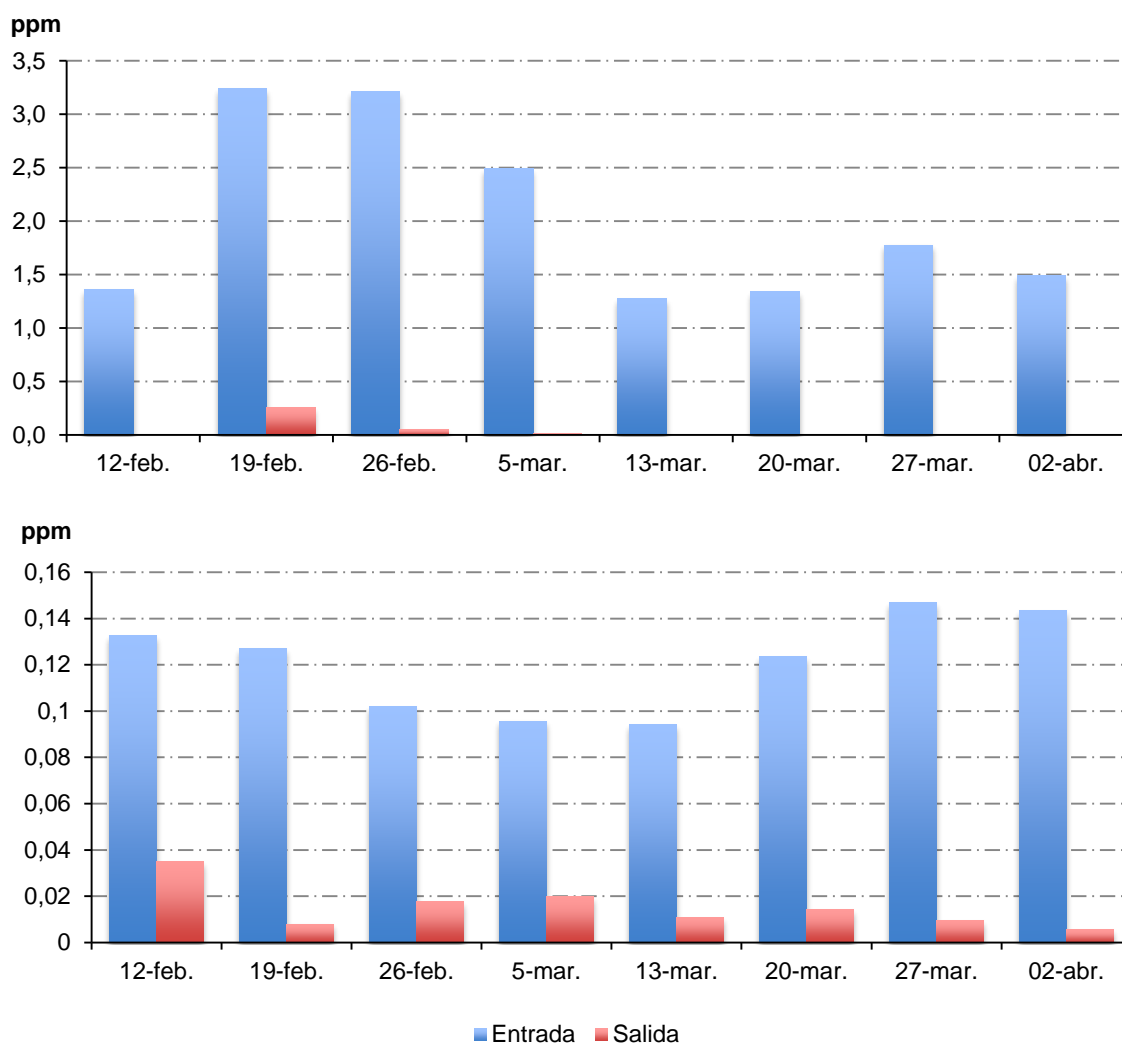


Figura 8-31. Extinción de los nutrientes en el sistema durante el primer ensayo de la segunda experiencia. Arriba los nitratos y abajo los fosfatos.

El seguimiento de nutrientes entrantes solo se pudo analizar en el primer ensayo. Como se puede observar en la fig. 8-32 la capacidad de biofiltración del sistema es muy alta. Cabe destacar que tan solo 250 g de plantas repartidas en los 4 tanques casi agotan las 3,5 ppm de NO_3^- del efluente. Los niveles de PO_4^- , aunque mucho más bajos que los de nitrato en el efluente, también son mitigados casi en su totalidad en todos los muestreos realizados. De la biofiltración de nitrito y amonio no se pudo obtener resultados concluyentes debido a su presencia prácticamente residual; esto es debido a los potentes filtros de lecho fluido cargados con bacterias desnitrificantes del sistema que optimizan las condiciones de cultivo de los peces en el circuito semi-cerrado del interior de la planta.

8-2.5. Conclusiones

Estas nuevas experiencias “indoor” realizadas con *Saccharina latissima* vuelven a demostrar que esta especie puede ser una alternativa usada como filtro biológico en sistemas de AMTI en tierra por su potencial tasa de crecimiento y valor añadido medio-alto de la producción obtenida.

La tasa de crecimiento de *S. latissima* está en relación inversa al tamaño de las plantas. Esta tasa se ve, además, muy influenciada por las altas temperaturas y el aumento del fotoperiodo, aunque gracias a las grandes variaciones noche-día de la temperatura del agua en los tanques y la posibilidad de sombreado, este tipo de cultivos se pueden prolongar más en el tiempo que los de mar abierto.

Con el tipo de tanque y tallas de planta empleados la densidad máxima de cultivo es de alrededor de los 12 kg/m³ y la máxima producción semanal se obtiene a densidades en torno a 6 kg/m³. A diferencia de las tasas de crecimiento, estas cifras son independientes de la talla de las plantas, al menos con las ensayadas, todas de tipo juvenil con pequeña diferenciación tisular.

Los índices proteicos alcanzados en este tipo de cultivos son de media un 50% más altos que en plantas salvajes. Estos valores suponen mayores posibilidades de empleo del producto (por ej. en la alimentación animal) y un importante incremento del valor añadido de cara a su venta.

La capacidad de absorción de nutrientes por parte de *S. latissima* en este tipo de disposición de tanques en serie es muy elevada en cuanto a NO₃⁻ y PO₄⁻. Respecto al NH₄⁺ y NO₂⁻ los valores no fueron concluyentes debido a sus bajas concentraciones en esta planta de cultivo. El pH y los valores de reserva alcalina son parámetros muy importantes a controlar debido a estar muy relacionado con la dinámica del cultivo.

Una conclusión interesante es la capacidad que tiene *S. latissima* para resistir condiciones ambientales estresantes si cuenta con un buen aporte de nutrientes, fenómeno que ha quedado claramente de manifiesto una vez que varios de los períodos ensayados en estas experiencias no presentaron precisamente las mejores condiciones ambientales para el desarrollo de esta especie, por lo que las algas de los tanques de cola crecieron muy poco o murieron.

Capítulo 9 - Conclusiones generales “indoor”

La principal conclusión que podemos extraer de todas las experiencias “indoor” realizadas con *Saccharina latissima* es que esta especie por su alta tasa de crecimiento y valor añadido medio-alto de la producción obtenida puede ser una buena alternativa de uso tanto como filtro biológico de efluentes como parte de sistemas de AMTI en tierra en nuestras latitudes durante los meses desde finales del otoño a mediados de primavera. La alta concentración de nutrientes de estas instalaciones además no resulta tóxica para esta especie, ni de manera aguda ni de manera crónica; incluso hace que la especie tolere un mayor estrés ambiental.

Desde el punto de vista productivo con el tipo de tanques ensayados se han llegado a densidades de cultivo máximas de 12 kg/m^3 , siendo las óptimas en términos de cosecha semanal de unos 6 kg/m^3 independientemente del tamaño de las plantas. Por otra parte, la tasa de crecimiento de *S. latissima* es inversamente proporcional al tamaño de las plantas.

La luz incidente en instalaciones exteriores no es limitante por exceso para el desarrollo de esta especie, aunque sería conveniente poner al menos algún recubrimiento que filtre la radiación ultravioleta para una mayor productividad. Si se quisiera aumentar la producción habría que incidir más que en la intensidad lumínica en el diseño de los tanques, movimiento de las algas y, en su caso, en un aumento del fotoperíodo con el auxilio de lámparas de poco consumo dada la eficiencia fotosintética de la especie.

La capacidad de absorción de nutrientes por parte de *S. latissima* en sistemas en serie es muy elevada, aunque los valores de producción, como es lógico, van disminuyendo a medida que se desciende en el sistema en cascada. Con una disposición en paralelo de los tanques se obtendrían producciones mayores y más homogéneas en detrimento de la calidad del filtrado.

Por la alta concentración de nutrientes de los efluentes de este tipo de granjas la tasa de renovación del agua de los tanques puede ser muy baja, con el ahorro energético que ello supone. Sin embargo, si la renovación es excesivamente baja debería instalarse un sistema automático de medición y corrección de pH para evitar oscilaciones letales del mismo. Igualmente en sistemas de muy baja renovación es necesario controlar también la reserva alcalina del agua.

Sección V - Resumen y Conclusiones



Capítulo 10 - Resumen y Conclusiones

10-1. Resumen

La presente memoria es el fruto del estudio del desarrollo, optimización y aplicaciones del cultivo de la macroalga marina *Saccharina latissima* (Laminariales, Ochrophyta) en sistemas multitróficos. *Saccharina latissima* por su versatilidad biológica y valor añadido como alga alimentaria es una de las mejores candidatas europeas para el desarrollo de sistemas acuícolas de enfoque ecosistémico, y por ello, en esta memoria se exploran estas capacidades en el Noroeste de la Península Ibérica (Galicia, España) en los dos ámbitos principales de su aplicación en sistemas de AMTI (acuicultura multitrófica integrada): los sistemas “outdoor” y los sistemas “indoor”.

En las experiencias “outdoor” se propone un nuevo sistema de cultivo en cuerdas verticales en “v” sobre líneas dobles flotantes que, además de ser muy seguro y versátil, arroja cifras de producción tan altas o, incluso, mayores que las obtenidas en otras partes del Atlántico Norte y en tiempos de cultivo significativamente menores. Se estudian también estrategias encaminadas a aumentar la ventana de cultivo para esta especie en nuestras aguas mediante técnicas de trasplante de plantas precultivadas en tierra. Por otra parte se demuestra que la integración del cultivo de *S. latissima* con otros organismos es muy positiva, tanto por la mayor calidad de la cosecha como por los beneficios ambientales que de su producción se derivan. Se demuestra también que a la hora de integrar los cultivos de macroalgas con los de otros organismos es preferible optar por sistemas en mosaico en los que los cultivos de algas son totalmente independientes y guardan cierta distancia de los otros cultivos más que optar por estructuras comunes de cultivo mixto.

En las experiencias “indoor” se demuestra que *S. latissima* es un excelente biofiltro de efluentes de plantas de cultivo intensivo de peces, adaptándose perfectamente a su cultivo en suspensión en aguas muy cargadas de nutrientes. Es además una especie de gran eficiencia y productividad en bajas condiciones de luz y temperatura, lo que la hace especialmente adecuada para su empleo en sistemas integrados durante el otoño e invierno. La cosecha obtenida en este tipo de sistemas es además especialmente rica en proteínas, lo que aumenta considerablemente sus expectativas de uso y valor añadido.

10-2. Conclusiones

Se concluye finalmente que *Saccharina latissima* es una especie extraordinariamente versátil para su empleo en sistemas de AMTI al poder ser utilizada de igual manera en tanto en sistemas “outdoor” como “indoor”.

Es además una especie de alta eficiencia fotosintética en condiciones de baja temperatura y dosis lumínica, por lo que viene a cubrir un hueco importante que las especies de macroalgas más habitualmente utilizadas como biofiltro o peldaño trófico, más termófilas y fotófilas, como *Ulva* spp. o *Gracilaria* spp. no son capaces de cubrir.

En sistemas “outdoor”, a pesar de la estrecha ventana de cultivo con la que se cuenta, se obtienen cosechas de gran calidad y, además, similares e, incluso, superiores a las obtenidas en otras partes del Atlántico norte después de casi el doble de tiempo de cultivo.

El diseño de las líneas de cultivo y los sistemas de conducción ensayados en esta memoria garantizan producciones tanto cuantitativa como cualitativamente mayores que las obtenidas en sistemas de cuerdas de cultivo en horizontal, además de ser un sistema más seguro y versátil.

La integración de los cultivos tanto “outdoor” como “indoor” de *Saccharina latissima* con peces y/o moluscos es muy positiva ya que, al menos, acarrea un mayor contenido proteico en las algas debido sin duda a la mayor asimilación de formas de nitrógeno procedentes del metabolismo de estos organismos, lo que indica, además, que están retirando del medio formas de nitrógeno que de una u otra forma tiene origen antrópico, lo que demuestra los beneficios ambientales de estos cultivos.

Al menos en las rías gallegas es preferible el desarrollo de sistemas de acuicultura multitrófica peces-moluscos-algas en mosaico frente a sistemas contiguos, lo que tiene importantes implicaciones a la hora de la futura ordenación litoral de la producción acuícola. Además esta disposición en mosaico no condiciona ni la proporción de unos y otros cultivos ni sus técnicas de manejo.

Referencias bibliográficas

- ABREU, M.L., VARELA, D.A., HENRÍQUEZ, L., VILLARROEL, A., YARISH, C., SOUSA-PINTO, I., BUSCHMANN, A.H., (2009). Traditional vs. integrated multi-trophic aquaculture of *Gracilaria chilensis* C.J. Bird J., McLachlan & E.C. Oliveira: productivity and physiological performance. *Aquaculture*, **293**: 211-220.
- AHN, O., PETRELL, R.J., HARRISON, P.J., (1998). Ammonium and nitrate uptake by *Saccharina latissima* and *Nereocystis luetkeana* originating from a salmon sea cage farm. *Journal of Applied Phycology*, **10**: 333-340.
- BARRINGTON, K., CHOPIN, T., ROBINSON, S., (2009). *Integrated multitrophic aquaculture (IMTA) in marine temperate waters*. In: Soto, D. (Ed.), *Integrated mariculture: a global review*. FAO Fisheries and Aquaculture Technical Paper, No. 529, FAO. Rome, 7-46pp.
- BAYNE, B.L., WIDDOWS, J., THOMPSON, R.J., (1976). *Physiology II*. In: Bayne B.L. (Ed.), *Marine mussels: their ecology and physiology*. Cambridge University Press, Cambridge, pp. 207-260.
- BIXLER, H.J., PORSE, H. (2012). A decade of change in the seaweed hydrocolloids industry. *Journal of Applied Phycology*, **23**: 321-335.
- BRINKHUIS, B.H., MARIANI, E.C., BREDA, V.A., BRADY-CAMPBELL, M.M., (1984). Cultivation of *Saccharina latissima* in the New York Marine Biomass Program. *Hydrobiologia*, **116/117**: 177-266.
- BRUHN, J., GERARD, V.A., (1996). Photoinhibition and recovery of the kelp *Laminaria saccharina* at optimal and superoptimal temperatures. *Oceanography and Marine Biology*, **125**: 639-648.
- BUCK, B., BUCHHOLZ, C., (2004). The offshore-ring: A new system design for the open ocean aquaculture of macroalgae. *Journal of Applied Phycology*, **16**: 355-368.
- BUSCHMANN, A.H., WESTERMEIER, R., RETAMALES, C.A., (1995). Cultivation of *Gracilaria* on the sea-bottom in southern Chile: a review. *Journal of Applied Phycology*, **7**: 291-301.
- BUSCHMANN, A.H., TROELL, M., KAUTSKY, N., (2001). Integrated algal farming: a review. *Cahiers de Biologie Marine*, **42**: 83- 90.
- BUSCHMANN, A.H., RIQUELME, V.A., HERNÁNDEZ-GONZÁLEZ, M.C., VARELA, D., JIMÉNEZ, J.E., HENRÍQUEZ, L.A., VERGARA, P.A., GUÍÑEZ, R., FILÚN, L., (2007). A review of the impacts of salmonid farming on marine coastal ecosystems in the southeast Pacific. *Journal of Marine Science*, **63**: 1338-1345.
- BUSCHMANN, A.H., STEAD, R.A., HERNÁNDEZ-GONZÁLEZ, M.C., PEREDA, S.V., PAREDES, J.E., MALDONADO, M.A., (2013). Un análisis crítico sobre el uso de macroalgas como base para una acuicultura sustentable. *Revista chilena de historia natural*, **86**: 251-264.
- CABANAS, J.M., GONZÁLEZ, J.J., MARIÑO, J., PÉREZ, A., ROMÁN, G., (1979). Estudio del mejillón y de su epifauna en los cultivos flotantes de la Ría de Arosa. III. Observaciones previas sobre la retención de partículas y la biodeposición de una batea. *Boletín del Instituto Español de Oceanografía*, **5**: 43-50.
- CARBALLEIRA, A., DEVESE, C., RETUERTO, R., SANTILLAN, E., UCIEDA, F., (1983). *Bioclimatología de Galicia*. Fundación Pedro Barrié de la Maza. A Coruña, 391pp.

-
- CARBALLEIRA, C., ESPINOSA, J., CARBALLEIRA, A., (2011). Linking $\delta^{15}\text{N}$ and histopathological effects in molluscs exposed *in situ* to effluents from land-based marine fish farms. *Marine Pollution Bulletin*, **62** (12): 2633-2641.
- CARBALLEIRA, C., VIANA, I.G., CARBALLEIRA, A., (2013). $\delta^{15}\text{N}$ values of macroalgae as an indicator of the potential presence of waste disposal from land-based marine fish farms. *Journal of Applied Phycology*, **25**: 97-107.
- CARCAJONA, D., (2011). *Experiencia de siembra de plántulas de Saccharina latissima (Laminariales, Phaeophyta) para producción industrial en la ría de Ares y Betanzos (A Coruña)*. Trabajo fin de Máster. Máster Interuniversitario Gallego en Acuicultura. Universidade da Coruña.
- CHAPMAN, V.J., CHAPMAN, D.J., (1980). *Seaweeds and their uses*. Chapman and Hall, London, New York, 334 pp.
- CHENG, T.-H., (1969). Production of kelp - a major aspect of China's exploitation of the sea. *Economic Botany*, **20**:215-236.
- CHESTER, R., JICKELLS, T., (2012). *Marine Geochemistry*. Willey-Blackwell. 420pp.
- CHOPIN, T., BUSCHMANN, A.H., HALLING, C., TROELL, M., KAUTSKY, N., NEORI, A., NEEFUS, C., (2001). Integrating seaweeds into marine aquaculture systems: a key toward sustainability. *Journal of Phycology*, **37**: 975-986.
- CHOPIN, T., ROBINSON, S., SAWHNEY, M., BASTARACHE, S., BELYEA, E., SHEA, R., ARMSTRONG, W., STEWART, I., FITZGERALD, P., (2004). The AquaNet integrated multi-trophic aquaculture project: rationale of the project and development of kelp cultivation as the inorganic extractive component of the system. *Bulletin of the Aquaculture Association of Canada*, **104**: 11-18.
- CHOPIN, T., (2006). Integrated multi-trophic aquaculture. What it is, and why you should care... and don't confuse it with polyculture. *Northern Aquaculture*, **12**(4): 4.
- CHOPIN, T., ROBINSON, S., TROELL, M., NEORI, A., BUSCHMANN, A., FANG, J.G., (2008). *Multi-trophic integration for sustainable marine aquaculture*. In: Jørgensen, S.E., Fath, B.D. (Eds.), *Ecological Engineering. Encyclopedia of Ecology*. Elsevier, Oxford, 2463-2475pp.
- CHOPIN, T., YARISH, C., SHARP, G. (2007). *Beyond the monospecific approach to animal aquaculture the light of integrated multi-trophic aquaculture*. In: Bert, T.M. (Ed.) *Ecological and genetic implications of aquaculture activities*. Springer, Dordrecht, 447-458pp.
- CREMADES, J., BÁRBARA, I., VEIGA, A.J., (1998). *Las macroalgas marinas y sus aplicaciones*. Proyecto Albatros, Fondo de Formación. Ferrol.
- CREMADES, J., FREIRE, Ó., BAAMONDE, S., SALINAS, J.M., FUERTES, C., (2007). *Nuevo método para el cultivo industrial de Laminaria saccharina (Laminariales, Phaeophyta) en las costas gallegas*. In: Cerviño Eiroa, A., Guerra Díaz, A., Pérez Acosta, C. (Eds.) *Actas del XI Congreso Nacional de Acuicultura, Consellería de Pesca e Asuntos Marítimos, Xunta de Galicia*. Vigo, 559-562 pp.
- CRESPI, V., COCHE, A.G., (2008). *Glossary of aquaculture*. FAO. Rome, 424pp.
- CRITCHLEY, A.T., OHNO, M. (Eds.). (1997). *Cultivation and Farming of Marine Plants*. World biodiversity Database CD-ROM series. UNESCO.
- CRITCHLEY, A.T., OHNO, M., LARGO, D.B., (2006). *World Seaweed Resources*. ETI. University of Amsterdam. (CD-ROM).
- DE CASTRO, M., GÓMEZ-GESTEIRA, M., PREGO, R., TABOADA, J.J., MONTERO, P., HERBELLO, P., PÉREZ-VILLAR, V., (2000). Wind and tidal influence on water
-

- circulation in a Galician ría (NW Spain). *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, **51**: 161-176.
- DONADIEU, Y., BASIRE, J., BOULON, C., (1985). *Les algues: Thérapeutiques naturelles*. Librairie Maloine S. A., Paris, 511pp.
- DRING, M.J., MAKAROV, V., SCHOSCHINA, E., LORENZ, M., LÜNING, K., (1996). Influence of ultraviolet radiation on chlorophyll fluorescence and growth in different life-history stages of three species of *Laminaria* (Phaeophyta). *Marine Biology*, **126**: 183-191.
- DRUEHL, L. D., BAIRD, R., LINDWALL, A., LLOYD, K. E., PAKULA, S., (1988). Longline cultivation of some Laminariaceae in British Columbia, Canada. *Aquaculture Research*, **19**: 253-263.
- EGAN, B., GARCIA-EZQUIVEL, Z., BRINKHUIS, B. H., YARISH, C., (1989). *Genetics of morphology and growth from the North Atlantic Ocean – Implications for biogeography*. In: Garbary, D. J., South, G. R. (Eds.). *Evolutionary Biogeography of the Marine Algae of the North Atlantic*. Canada, 219-240pp.
- EVANS, F., LANGDON, C. J., (2000). Co-culture of dulse *Palmaria mollis* and red abalone *Haliotis rufescens* under limited flow conditions. *Aquaculture*, **185**:137-158.
- FAO (2011). *Anuario FAO 2011. Estadísticas de pesca y acuicultura*. FAO, Roma, 77pp.
- FAO (2012). *The State of World Fisheries and Aquaculture*. Fisheries and Aquaculture Department, Food and Agriculture Organization in the United Nations. Rome, 202pp.
- FLAHERTY, R., (1934). *Man of Aran*. Gaumont British Picture.
- FRAGA, F., (1967). Hidrografía de la ría de Vigo, 1962, con especial referencia a los compuestos del nitrógeno. *Investigación pesquera*, **31**: 145-158.
- FRAGA, F., (1981). *Upwelling off the Galician Coast, Northwest of Spain*. In: RICHARDS, F. (Ed.), *Coastal upwelling.*, Vol. 1. American Geophysical Union. Washington, 176-182pp.
- FUNAYAMA, S., HIKINO, H., (1981). Hypotensive principle of *Laminaria* and allied seaweeds. *Planta Medica*, **41**: 29-33.
- GERARD, V.A., (1987). *Optimizing biomass production on marine farms*. In: Bird, K.T., Benson, P.H. (Eds.), *Seaweed Cultivation for Renewable Resources*. Elsevier Science Publishers, Amsterdam, 95-106pp.
- GERARD, V.A., (1990). Ecotypic differentiation in the kelp *Laminaria saccharina*: phase specific adaptation in a complex life cycle. *Marine Biology*, **107**: 519-528.
- GERARD, V.A., (1997a). Environmental stress during early development of kelp sporophytes (*Laminaria saccharina*): how long do effects persists. *Journal of Applied phycology*, **9**: 5-9.
- GERARD, V.A. (1997b). The role of nitrogen nutrition in high-temperature tolerance of the kelp, *Laminaria saccharina* (Chromophyta). *Journal of Phycology*, **33**: 800-810.
- GERARD, V.A., DUBOIS, K., GREENE, R. (1987). Growth responses of two *Laminaria saccharina* populations to enviromental variation. *Proceedings of the International Seaweeds Symposium*, **12**: 229-232.
- GÓMEZ PINCHETTI, J.L., SUÁREZ ÁLVAREZ, S., GÜENAGA UNZETABARRENECHEA, L., FIGUEROA, F.L., GARCÍA REINA, G., (2011). *Posibilidades para el desarrollo de sistemas integrados con macroalgas en las Islas Canarias y su entorno*. In: Macroalgas en la Acuicultura Multitrófica Integrada Peninsular. Valorización de su Biomasa. Centro Tecnológico del Mar, Fundación CETMAR, Vigo, 75-93pp.
- GRAJAL, M., (1990). *Procesos litorales en las Rías de Betanzos y Ares (A coruña)*. Ed. Pedro Barrié de la Maza. A Coruña. 339pp.
-

-
- GUERRERO, S., CREMADES, J., (2012). *Acuicultura Multitrófica Integrada. Una alternativa sostenible y de futuro para los cultivos marinos de Galicia*. Edita: Xunta De Galicia, Consellería do Medio Rural e do Mar, Centro de Investigacións Mariñas. Vilanova de Arousa, Pontevedra, 111pp.
- GUIRY, M. D., BLUNDEN, G., (1992). *Seaweed resources in Europe, Uses and potential*. John Wiley & Sons. Chichester, 432pp.
- GUIRY, M.D., DHONNCHA, N., (2009). *AlgaeBase*. Disponibilidad: <<http://www.algaebase.org>> Fecha de consulta: 13 marzo. 2009.
- HAINES, K.C., WHEELER, P.A., (1978). Ammonium and nitrate uptake by the marine macrophytes *Hypnea musciformis* (Rhodophyta) and *Macrocystis pyrifera* (Phaeophyta). *Journal of Phycology*, **14**: 319–324.
- HALLSSON, S.V., (1961). *The uses of seaweeds in Iceland*. Fourth International Seaweed Symposium. France.
- HANDÅ, A., FORBORD, S., WANG, X., BROCH, O.J., DAHLE, S.W., STØRSETH, T.R., REITAN, K.I., OLSEN, Y., SKJERMO, J., (2013). Seasonal- and depth-dependent growth of cultivated kelp (*Saccharina latissima*) in close proximity to salmon (*Salmo salar*) aquaculture in Norway. *Aquaculture*, **414-415**: 191-201.
- HANELT, D., WIENCKE, C., KARSTEN, U., (1997). Photoinhibition and recovery after high light stress in different developmental and life-history stages of *Laminaria saccharina* (Phaeophyta). *Journal of Phycology*, **33**: 387-395.
- HARRISON, P.J., DRUEHL, L.D., LLOYD, K.E., THOMPSON, P.A., (1986). Nitrogen uptake kinetics in three year-classes of *Laminaria groenlandica* (Laminariales: Phaeophyta). *Marine Biology*, **93**: 29-35.
- HEINRICH, S., VALENTIN, K., FRICKENHAUS, S., JOHN, U., WIENCKE, C., (2012). Transcriptomic analysis of acclimation to temperature and light stress in *Saccharina latissima* (Phaeophyceae). *PloS One*, **7**: 443-456.
- HERNÁNDEZ, I., MARTÍNEZ-ARAGÓN, J.F., TOVAR, A., PÉREZ-LLORENS, J.L., VERGARA, J.J., (2002). Biofiltering efficiency in removal of dissolved nutrients by three species of estuarine macroalgae cultivated with sea bass (*Dicentrarchus labrax*) waste waters 2. Ammonium. *Journal of Applied Phycology*, **14**: 375-384.
- HERNÁNDEZ, I., PÉREZ-PASTOR, A., VERGARA, J., MARTÍNEZ-ARAGÓN, J., FERNÁNDEZ-ENGO, M.Á., PÉREZ-LLORENS, J.L., (2006). Studies on the biofiltration capacity of *Gracilariopsis longissima*: from microscale to macroscale. *Aquaculture*, **252**: 43-53.
- HUNT, R., (1982). *Plant Growth Curves: the Functional Approach to Plant Growth Analysis*. Edward Arnold, London. 248pp.
- HUNTINGTON, B.E., BOYER, K.E., (2008). Evaluating patterns of nitrogen supply using macroalgal tissue content and stable isotopic signatures in Tomales Bay, CA. *Environmental Bioindicators*. **3**: 180-192.
- INDERGAARD, M., SKJÅK-BRAEK, G., JENSEN, A., (1990). Studies on the influence of nutrients on the composition and structure of alginate in *Laminaria saccharina* (L.) Lamour. (Laminariales, Phaeophyceae). *Botanica Marina*, **33**: 277-288.
- IZQUIERDO, J.L., NAVARRO, M.J., GALLARDO, T., (1993). Mapas de distribución de algas marinas de la Península Ibérica. IV. *Laminaria ochroleuca* Pylae, *L. hyperborea* (Gunner.) Foslie y *L. saccharina* (L.) Lamour. *Botanica complutensis*, **18**: 291-304.
- JACUMAR (2011). Junta Nacional Asesora de Cultivos Marinos - Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, 2011. *Acuicultura Integrada: experiencia piloto para el desarrollo de sistemas de cultivo multitróficos (2008-2011)*.
-

- Disponibilidad: < <http://www.acuiculturaintegrada.com/proyecto/> > Fecha de consulta: 20 marzo de 2010.
- JIMÉNEZ DEL RÍO, M., RAMAZANOV, Z., GARCÍA-REINA, G., (1994). Optimization of yield and biofiltering efficiencies of *Ulva rigida* C. Ag. cultivated with *Sparus aurata* L. waste waters. *Scientia Marina*, **58**: 329-335.
- JIMÉNEZ DEL RÍO, M., RAMAZANOV, Z., GARCÍA-REINA, G., (1996). *Ulva rigida* (Ulvales, Chlorophyta) tank culture as biofilters for dissolved inorganic nitrogen from fishpond effluents. *Hydrobiologia*, **326/327**: 61-65.
- JIMÉNEZ-ESCRIG, A., GOÑI CAMBRODÓN, I., (1999). Evaluación nutricional y efectos fisiológicos de macroalgas marinas comestibles. *Archivos Latinoamericanos de Nutrición*, **49**: 114-120.
- JONES, A.B., DENNISON, W.C., PRESTON, N.P., (2001). Integrated treatment of shrimp effluent by sedimentation, oyster filtration and macroalgal absorption: a laboratory scale study. *Aquaculture*, **193**: 155-178.
- KAIN, J.M., NORTON, T.A., (1990). *Marine ecology*. In: Cole, K.M., Sheath, R., (Eds.), The biology of red algae. Cambridge University Press. Cambridge, 377-422pp.
- KANG, C.K., CHOY, E.J., SON, Y., LEE, J.-Y., KIM, J.K., KIM, Y., LEE, K.-S., (2008). Food web structure of a restored macroalgal bed in the eastern Korean peninsula determined by C and N isotope analyses. *Maine Biology*, **153**:1181-1198.
- KAWASHIMA, S., (1984). Kombu cultivations in Japan for human foodstuff. *Japanese Journal of Phycology*, **32**: 379-394.
- LAMELA M., ANCA J., VILLAR R., OTERO J., CALLEJA J.M., (1989). Hypoglycemic activity of several seaweed extracts. *Journal of Ethnopharmacology*, **27**: 35-43.
- LANDER, T., BARRINGTON, K., ROBINSON, S., MACDONALD, B., MARTIN, J., (2004). Dynamics of the blue mussel as an extractive organism in an integrated multi-trophic aquaculture system. *Bulletin of the Aquaculture Association of Canada*, **104**: 19-28.
- LOBBAN, C.S., HARRISON, P.J., (1994) *Seaweed ecology and physiology*. Cambridge Univ. Press, Cambridge, 366pp.
- LÜNING, K. (1979). Growth strategies of three *Laminaria* species (Phaeophyceae) Inhabiting different depth zones in the sublittoral region of Helgoland (North Sea). *Marine Ecology Progress Series*, **1**: 195-207.
- LÜNING, K., (1990). *Seaweeds. Their Environment, Biogeography, and Ecophysiology*. John Wiley & Sons, Inc. Nueva York, 60-124pp.
- MACÍAS, J.C., AGUADO, F., GONZÁLEZ, N., GUERRERO, S., ESTÉVEZ, A., VALENCIA, J.M., CREMADES, J., (2008). *Acuicultura Integrada: desarrollo de experiencias de cultivos multitróficos en la costa española*. In: Rey-Méndez, M., Lodeiros, C., Fernández Casal, J., Guerra, A. (Eds.), Foro dos Recursos Mariños e da Acuicultura das Rías Galegas. 483-490pp.
- MAFF (1975). *Energy allowances and feeding systems for ruminants*. Technical Bulletin 33. Ministry of Agriculture, Fisheries and Food. HMSO, London.
- MAHR, O.P., OHNO, M., MATSUOKA, M., (1991). Culture of brown alga *Laminaria japonica* (Phaeophyta, Laminariales) in warm waters of Shikoku, Japan. *Indian Journal of Marine Sciences*, **20**: 55-60.
- MARKHAM, J.W., LÜNING, K., SPERLING, K.R., (1979). Automatic culture systems for growing *Laminaria saccharina* (Phaeophyceae) and testing the effects of pollutants. *Proceedings of the International Seaweeds Symposium*, **9**: 153-159.
- MARTÍNEZ-ARAGÓN, J.F., HERNÁNDEZ, I., PÉREZ-LLORENS, J.L., VÁSQUEZ, R., VERGARA, J.J., (2002). Biofiltering efficiency in removal of dissolved nutrients by
-

- three species of estuarine macroalgae cultivated with sea bass (*Dicentrarchus labrax*) waste waters. 1. Phosphate. *Journal of Applied Phycology*, **14**: 365-374.
- MATOS, J., COSTA, S., RODRIGUES, A., PEREIRA, R., SOUSA PINTO, I., (2006). Experimental integrated aquaculture of fish and red seaweeds in Northern Portugal. *Aquaculture*, **252**: 31-42.
- MIFFLIN, B.J., LEA, P.J., (1976). The pathway of nitrogen assimilation in plants. *Phytochemistry*, **152**(1): 873-885.
- M.O.P.U. (1981). *Plan indicativo de usos del dominio público litoral. Tramo de Costa: Provincia de La Coruña*. Carta N° 70. Madrid, Ministerio de Obras Públicas y Urbanismo.
- MORA, S., DEMERS, S., VERNET, M., (2000). *The effects of the UV radiation in the Marine Environment*. Cambridge University Press, Cambridge. 324 pp.
- NAYLOR, R.L., GOLDBURG, R.J., PRIMAVERA, J.H., KAUTSKY, N., BEVERIDGE, M.C.M., CLAY, J., FOLKE, C., LUBCHENCO, J., MOONEY, H., TROELL, M., (2000). Effect of aquaculture on world fish supplies. *Nature*, **405**: 1017-1024.
- NELSON, S., GLENN, E., CONN, J., MOORE, D., WALSH, T., AKUTAGAWA, M., (2001). Cultivation of *Gracilaria parvispora* (Rhodophyta) in shrimp-farm effluent ditches and floating cages in Hawaii: a two-phase polyculture system. *Aquaculture*, **193**: 239-248.
- NEORI, A., CHOPIN, T., TROELL, M., BUSCHMANN, A., KRAEMER, G., HALLING, C., SHPIGEL, M., YARISH, C., (2004). Integrated aquaculture: rationale, evolution and state of the art emphasizing seaweed biofiltration in modern mariculture. *Aquaculture*, **231**: 361-391.
- NEORI, A., (2007). Essential role of seaweed cultivation in integrated multi-trophic aquaculture farms for global expansion of mariculture: an analysis. *Journal of Applied Phycology*, **20**: 567-570.
- NEWTON, L., (1951). *Seaweed utilization*. Purnell & sons. Londres, 170pp.
- OKAI, Y., HIGASHI-OKAI, K., NAKAMURA, S., (1993). Identification of heterogeneous antimutagenic activities in the extract of edible brown seaweeds, *Laminaria japonica* (Makonbu) and *Undaria pinnatifida* (Wakame) by the umu gene expression system in *Salmonella typhimurium* (TA1535 / pSK1002). *Mutation Resource*, **303**: 63-70.
- PAPADAKIS, J., (1966). *Climates of the world and their agricultural potentialities*. Ed. autor. Buenos Aires. 170 pp.
- PARAGES, M.L., HEINRICH, S., WIENCKE, C., JIMÉNEZ, C., (2013). Rapid phosphorylation of MAP kinase-like proteins in two species of Arctic kelps in response to temperature and UV radiation stress. *Environmental and Experimental Botany*, **91**: 30-37.
- PARKE, M. (1948). Studies on British *Laminariaceae*. I. Growth in *Laminaria saccharina* (L.) Lamour. *Journal Marine Biological Association U.K.*, **27**: 651-709.
- PÉREZ CAMACHO, A., GONZÁLEZ, R., FUENTES, J., (1991). Mussel culture in Galicia (N.W. Spain). *Aquaculture*, **94**: 263-278.
- PÉREZ CAMACHO, A., SALINAS, J.M.; DELGADO, M.; FUERTES, C., (2007). Use of single cell detritus (SCD) produced from *Laminaria saccharina* in the feeding of the clam *Ruditapes decussatus* (Linnaeus, 1758). *Aquaculture*, **266**: 211-218.
- PÉREZ CORDERO, S., (2012). *Optimización del cultivo industrial de Saccharina latissima (Laminariales, Phaeophyta) en la Ría de Ares y Betanzos (A Coruña)*. Trabajo Fin de Máster. Master Interuniversitario Gallego em Acuicultura. Universidade da Coruña.
- PEREZ, R., KAAS, R., CAMPELLO, F., ARBAULT, S., BARBAROUX, O., (1992). *La Culture des algues marines dans le monde*. Ifremer, Plouzane, 613pp.

- PETEIRO, C., FREIRE, Ó., (2009). Effect of outplanting time on commercial cultivation of kelp *Laminaria saccharina* at the southern limit in the Atlantic coast, N.W Spain. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*, **27**: 54-60.
- PETEIRO, C., FREIRE, Ó., (2012). Observations on fish grazing of the cultured kelps *Undaria pinnatifida* and *Saccharina latissima* (Phaeophyceae, Laminariales) in Spanish Atlantic waters. *AACL Bioflux*, **5**: 189-196.
- PETEIRO, C., FREIRE, Ó., (2013). Biomass yield and morphological features of the seaweed *Saccharina latissima* cultivated at two different sites in a coastal bay in the Atlantic coast of Spain. *Journal of Applied Phycology*, **25**: 205-213.
- PETEIRO, C., SALINAS, J.M., FREIRE, Ó., FUERTES, C., (2006). Cultivation of the autoctonous seaweed *Laminaria saccharina* off the Galician coast (NW Spain): production and features of the sporophytes for an annual and biennial harvest. *Thalassas*, **22**: 45-53.
- PETEIRO, C., SÁNCHEZ, N., DUEÑAS-LIAÑO, C., MARTÍNEZ, B., (2014). Open-sea cultivation by transplanting young fronds of the kelp *Saccharina latissima*. *Journal of Applied Phycology*, **26**: 519-528.
- PETRELL, R.J., ALIE, S. Y., (1996). Integrated cultivation of salmonids and seaweeds in open systems. *Hydrobiologia*, **326**: 67-73.
- PHILLIPS, D.J.H., (1990). *Use of macroalgae and invertebrates as monitors of metal levels in estuaries and coastal waters*. In: Furness, R.W., Rainbow, P.S., (Eds.), *Heavy Metals in the marine environment*. CRC Press, Inc., Boca Raton. Florida, 81-99pp.
- REY-SALGADO, J., (1993). *Relación morfosedimentaria entre la Plataforma Continental de Galicia y las Rías bajas y su evolución durante el Cuaternario*. Instituto Español de Oceanografía, Publicaciones Especiales. **17**, 233pp.
- RIDLER, N., WOWCHUK, M., ROBINSON, B., BARRINGTON, K., CHOPIN, T., ROBINSON, S., PAGE, F., REID, G., SZEMERDA, S., SEWUSTER, J., BOYNE-TRAVIS, S., (2007). Integrated multi-trophic aquaculture (IMTA); a potential strategic choice for farmers. *Aquaculture Economics and Management*, **11**: 99–110.
- RUITTON, S., VERLAQUE, M., AUBIN, G., BOUDOURESQUE, C.F., (2006). Grazing on *Caulerpa racemosa* var. *cylindracea* (Caulerpales, Chlorophyta) in the Mediterranean Sea by herbivorous fishes and sea urchins. *Vie et Milieu*, **56**: 33-41.
- SALINAS MORRONGO, J.M., (2011). *Cultivo de laminariales y acuicultura multitrófica*. In: Macroalgas en la Acuicultura Multitrófica Integrada Peninsular. Valorización de su Biomasa. Centro Tecnológico del Mar, Fundación CETMAR, Vigo, 29-51pp.
- SALINAS, J.M., CREMADES, J., PETEIRO, C., FUERTES, C., (2006). Influencia de las características del hilo de siembra en el cultivo experimental de *Undaria pinnatifida* (Harvey) Suringar y *Laminaria saccharina* (L.) Lamouroux (Laminariales, Phaeophyta). *Boletín del Instituto Español de Oceanografía*, **22** (1-4): 65-72.
- SALINAS, J.M., FUERTES, C., CREMADES, J., GUERRERO, S., (2009). Fitotoxicidad inducida por formaldehído, amonio cuaternario y peróxido de hidrógeno sobre la macroalga marina *Saccharina latissima* (Laminariales, Phaeophyta). *Actas XII Congreso Nacional de Acuicultura, Madrid, 24-26 de noviembre de 2009*: 668-669.
- SANDERSON, J.C, DRING M.J., DAVIDSON, K., KELLY, M.S., (2012). Culture, yield and bioremediation potential of *Palmaria palmata* (Linnaeus) Weber & Mohr and *Saccharina latissima* (Linnaeus) C.E. Lane, C. Mayes, Druehl & G.W. Saunders adjacent to fish farm cages in northwest Scotland. *Aquaculture*, **354-355**: 128-135.
- SAUVAGEAU, M. C. *Recherches sur les laminaires des cotes de France*. (1918). *Mémoires de l'Académie des Sciences de l'Institut de France*, **56**: 1-224.

-
- SUBANDAR, A., PETRELL, R.J., HARRISON, P.J., (1993). *Laminaria* culture for reduction of dissolved inorganic nitrogen in salmon farm effluent. *Journal of Applied Phycology*, **5**: 455-463.
- SYRETT, P.J., (1981). *Nitrogen metabolism of microalgae*. In: T. Platt (Ed.), *Physiological Bases of Phytoplankton Ecology*. Canadian Bulletin of Fisheries and Aquatic Sciences, **210**: 182-210.
- TROELL, M., HALLING, C., NEORI, A., CHOPIN, T., BUSCHMANN, A.H., KAUTSKY, N., YARISH, C., (2003). Integrated mariculture: asking the right questions. *Aquaculture*, **226**: 69-90.
- TROELL, M., ROBERTSON-ANDERSSON, D., ANDERSON, R.J., BOLTON, J.J., MANEVELDT, G., HALLING, C., PROBYN, T., (2006). Abalone farming in South Africa: an overview with perspectives on kelp resources, abalone feed, potential for on-farm seaweed production and socio-economic importance. *Aquaculture*, **257**: 266-281.
- WERNER, A., CLARKE, D., KRAAN, S., (2004). *Strategic Review and the Feasibility of Seaweed Aquaculture in Ireland*. Marine Institute. Ireland, 120 pp.
- YAMAMOTO, I., MARUYAMA, H., MORIGUCHI, M., (1987). The effect of dietary seaweeds on 7, 12-dimethyl-benzaanthracene-induced mammary tumorigenesis in rats. *Cancer letter*, **35**: 109-18.
- YAN, X., CHUDA, Y., SUZUKI, M., NAGATA, T., (1999). Fucoxanthin as the major antioxidant in *Hijikia fusiformis*, a common edible seaweed. *Bioscience Biotechnology Biochemistry*, **63**: 605-607.
- ZHOU, Y., YANG, H., HU, H., LIU, Y., MAO, Y., ZHOU, H., XU, X., ZHANG, F., (2006). Bioremediation potential of the macroalga *Gracilaria lemaneiformis* (Rhodophyta) integrated into fed fish culture in coastal waters of north China. *Aquaculture*, **252**: 264-276.

Anexo

Saccharina latissima (Laminariales, Ochrophyta) farming in an industrial IMTA system in Galicia (Spain)

José R. C. Freitas Jr. · Juan Manuel Salinas Morrondo ·
Javier Cremades Ugarte

Received: 2 July 2014 / Revised and accepted: 5 January 2015
© Springer Science+Business Media Dordrecht 2015

Abstract The development of integrated multitrophic aquaculture (IMTA) systems in Spain has been rather limited so far. However, trials carried out in recent years at experimental and at small industrial scale have been very promising. One of the most encouraging experiences involves the development of seaweed farming for human consumption in combination with mussel rafts in Galicia (NW Spain). Here, we describe a new and more productive marine farming system of *Saccharina latissima* (“sugar kelp”) combined with mussel rafts. We show its level of integration in terms of harvest and protein content as well as an assessment of the sources of assimilated nitrogen through the analysis of $\delta^{15}\text{N}$ isotope ratios. Oceanographic conditions in Northwest Spain make *S. latissima* behave like a winter-spring species in culture with a growing period of just 5–6 months. Nonetheless, production values in our experiment equalled or exceeded those recorded in northern parts of the Atlantic where the culturing period is almost twice as long. Compared to natural populations, *S. latissima* from mussel-integrated culture systems had almost twice as much protein content, giving greater added value to the species both as food and feed.

Keywords Seaweed aquaculture · Phaeophyceae · IMTA systems · *Mytilus* · Atlantic Ocean · Protein enrichment · Nitrogen supply · Stable isotopes

J. R. C. Freitas Jr. · J. Cremades Ugarte (✉)
Coastal Biology Research Group (BioCost), Facultad de Ciencias
and Centro de Investigaciones Científicas Avanzadas (CICA),
Universidad de A Coruña, 15071 A Coruña, Spain
e-mail: javier.cremades@udc.es

J. M. Salinas Morrondo
Planta de cultivo “El Bocal”, Instituto Español de Oceanografía
(IEO), 39012 Monte (Santander), Spain

Introduction

Spanish aquaculture production is the highest in the EU totaling 252,000 t, nearly 20 % of the European total (APROMAR 2013). Shellfish culturing is dominated by mussel farming (*Mytilus galloprovincialis* Lamarck 1819) in rafts in Galicia (over 220,000 t), the region located in the northwest of the Iberian Peninsula that has placed Spain as the second largest mussel producer in the world after China. Mussel farming in rafts together with other shellfish has great social impact.

The early history of integrated multitrophic aquaculture (IMTA) in Spain was mostly empirical and must be traced back to aquaculture techniques developed in the early 1940s in salt marshes of southern Spain as an alternative to the crisis of shrimp culturing (*Penaeus kerathurus*). In the last decades of 20th and early 21st centuries, most research focused on the use of several species of seaweed as biofilters in experimental IMTA units as part of EU research projects such as *Seapura*, *AquaAgris*, and others (Jiménez del Río et al. 1994, 1996; Martínez-Aragón et al. 2002; Hernández et al. 2002, 2006; Gómez Pinchetti et al. 2011). However, the first true experiences of IMTA can be found in initiatives promoted and financed by the National Advisory Board for Mariculture (JACUMAR, an initiative of the Spanish Ministry of Agriculture, Food and Environment). Specifically, the project “Integrated aquaculture: Pilot experience for multi-trophic aquaculture development (2008–2011)” involved inland and offshore pilot experiences of integrated culture systems in six Spanish regions (Macías et al. 2008). The study presented here is part of this project and shows the outdoor farming of “sugar kelp” (*Saccharina latissima*) combined with mussel rafts (*Mytilus galloprovincialis*).

A number of features make *S. latissima* (Linnaeus) C.E. Lane, C. Mayes, Druehl and G.W. Saunders (Laminariales, Ochrophyta) the more promising European native kelp for

use as an inorganic extractive component in offshore IMTA systems: easy culturing, high growth rate (Lüning 1979), and considerable added value as food and feed. This edible seaweed is an excellent local substitute for the “Asian kombu,” *Saccharina japonica* (Areschoug) C.E. Lane, C. Mayes, Druehl and G.W. Saunders; it may also serve as raw material for various agricultural uses, alginate extraction, biogas production, and many other applications (Guiry and Blunden 1992; Bixler and Porse 2012).

Commercial offshore farming experiments of *S. latissima* in the Atlantic Ocean have been carried out in New York, USA (Brinkhuis et al. 1984), British Columbia, Canada (Druehl et al. 1988), the Isle of Man, UK (Kain et al. 1990), Helgoland, Germany (Buck and Buchholz 2004). However, these experiences focused solely on algal production. Experiments combining fish and/or shellfish with *S. latissima* as inorganic extractor in IMTA systems have been conducted in Canada on both oceans: in North Pacific in British Columbia (Subandar et al. 1993; Petrell and Alie 1996; Ahn et al. 1998), and in North Atlantic in the Bay of Fundy (Chopin et al. 2004; Barrington et al. 2009). In Europe, offshore IMTA experiments have been recently carried out in Scotland (Sanderson et al. 2012) and Norway (Handå et al. 2013), in both cases combined with salmon (*Salmo salar*) aquaculture. In NW Spain, the first experiments involving *S. latissima* farming associated with mussel rafts were conducted in a coastal estuary, the Ría de Ares y Betanzos (A Coruña, Galicia). However, these earlier experiences (Peteiro et al. 2006; Cremades et al. 2007; Peteiro and Freire 2009) focused only on the production of algae, regardless of the potential benefits of integrating seaweed culture with shellfish.

This study aimed to (i) develop and optimize *S. latissima* farming in Galician waters as part of an offshore IMTA system with mussel rafts and (ii) to evaluate the potential benefits of integration on yield, commercial quality, and diversification of aquaculture production.

Material and methods

Indoor culture

The strain of *S. latissima* used in this experiment was obtained from sporophytes collected near the cultivation area. Seed string with seedlings was produced according to the European protocol originally developed for the cultivation of *Undaria pinnatifida* (Harvey) Suringar by Perez et al. (1992) and adapted to *S. latissima* by Salinas (2011). Seedlings used in this experiment had an initial length of 2 ± 0.5 mm and density of 20 seedlings per mm of seed string.

Outdoor culture

Field cultivation was performed on a designated marine farming mariculture site in the middle of the Ría de Ares y Betanzos (Galicia, Northwest Spain), locally referred to as Arnela Polygon. The seaweed raft was located at $43^\circ 22' 42''$ N, $8^\circ 15' 36''$ W with a bathymetry between 10 and 14 m depending on the state of the tide (Fig. 1). The Ría de Ares y Betanzos is a 15 km long and 5 km wide estuary with two-layered circulation pattern: nutrient-rich bottom coastal water coming in and land-enriched surface water coming out (de Castro et al. 2000). In the vicinity of the experimental seaweed culture, mussel rafts are abundant. At the moment in this culture site, there are approximately 30 mussel rafts, and the annual production of each one is estimated between 33 and 48 t raft⁻¹ (Pérez Camacho et al. 1991). Mussels produce a great amount of detritus which Cabanas et al. (1979) estimated to be approximately 190 kg dry weight raft⁻¹ day⁻¹, of which 31.6 kg is organic matter, 14.3 kg organic carbon, and 1.7 kg organic nitrogen. Therefore, it is assumed that the waters surrounding seaweeds are enriched with organic and inorganic waste from the metabolic activity of these organisms.

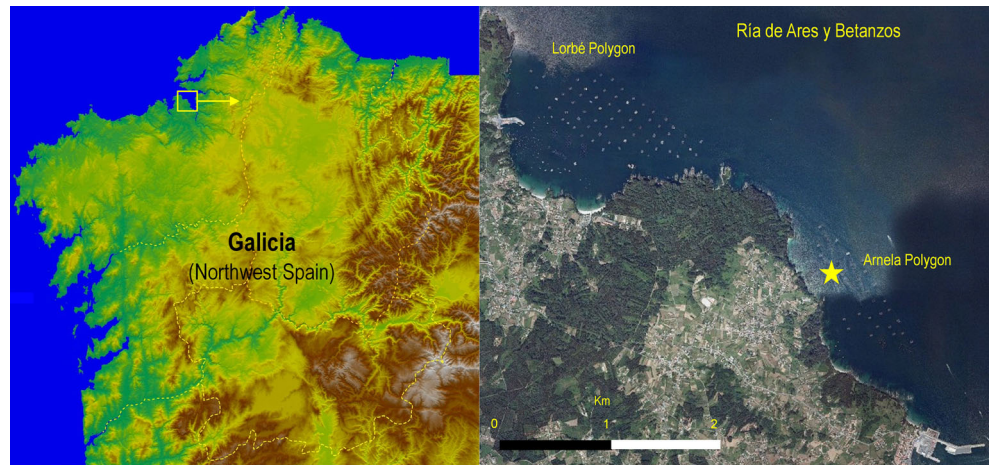
Each seaweed culture raft unit consisted of double floating long lines 70 m long connected by transverse 200 or 350-L floats every 5 m and attached at both ends to a marker 500-L buoy fixed to the bottom by structural ropes and concrete blocks. Units were placed parallel to the main direction of the tidal current and stretched horizontally by the weight and tension of the structural ropes. Long lines were refloated at every meter with the help of 3-L buoys. Polypropylene culture ropes 19 mm in diameter and 2 m in length were suspended from each of these buoys with a small concrete block at their ends to keep them tense (Fig. 2).

Seeding followed the so-called Japanese procedure. Briefly, the seed string was divided into small pieces 5 cm long (implants) that were inserted through the culture rope at 10 cm intervals. One linear m (11 implants) was seeded per rope. Ropes were seeded on November 27, 2009. On December 9, 2009, the whole system was revised, and temperature sensors with data logger (HOBO Pendant, Onset Computer Corporation, USA) were placed 1 m deep to record data every 15 min (Fig. 3).

Sampling and data analysis

Three destructive samplings were made: February 5, 2010 (70 culture days); March 10, 2010 (102 culture days); and April 17, 2010 (140 culture days; final harvest). On each sampling date, five culture ropes were randomly sampled around the raft and three implants per rope were collected for laboratory analyses: 1st (surface), 6th (0.5 m deep), and 11th (1 m deep). This design aimed to investigate the influence of depth on individual biometrics and biomass yield.

Fig. 1 Location of seaweed raft (*asterisk*) in the Amela Polygon of the Ría de Ares y Betanzos (Galicia, Northwestern, Spain) (orthophoto from the viewer SigPac of the Spanish Ministry of Agriculture, Food and Environment)



After weighing the implants, the heaviest specimens ($n=5$) were separated and measured (total weight, length, and width of the blade); also, their phenological stage (presence/absence of sporangial sori) and the degree of blade coverage by epiphytes were recorded. Growth rates as implant weight and weight, length and width of the sampled specimens were calculated according to the equation for relative growth rate (RGR) (Hunt 1982):

$$RGR_X = (\ln X_t - \ln X_o) / t$$

where X_o and X_t are the initial and final values of the every variable and t is the number of culture days in the sea. Data analyses were performed with the statistical package StatGraphics Centurion XV.

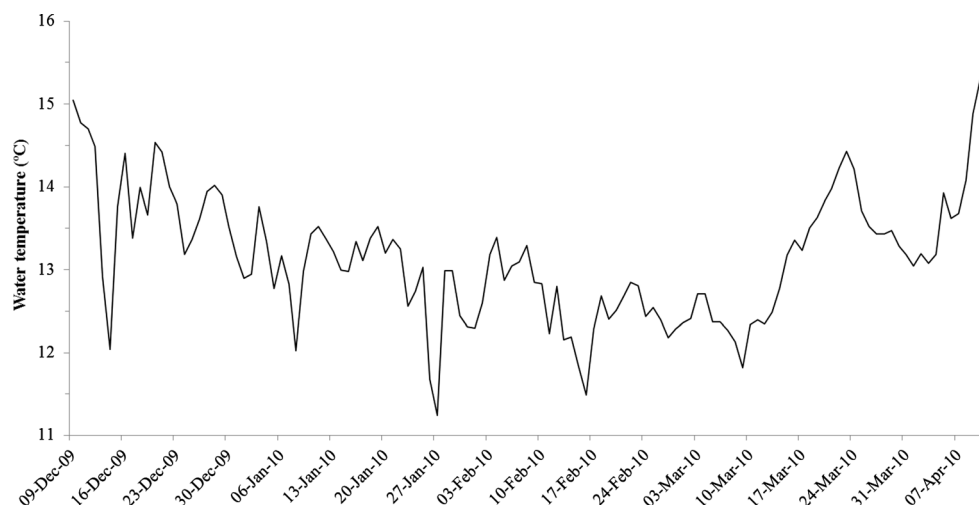
Fig. 2 Long lines of culturing seaweeds and detail of a culture rope of *Saccharina latissima* in February 10, 2010 (photos J. Cremades)



Stable isotopes

Stable nitrogen isotope ratios ($\delta^{15}\text{N}$) were estimated for a 5×5 -cm portion of the center of the blade of largest specimen from each implant. Blade fragments were carefully washed with filtered seawater to remove sediment and epiphytes, dried at 45°C in a forced air oven, and ground in an ultracentrifugal mill (Retsch ZM 100). Then, 3 mg aliquots were weighed and packed into tin capsules (EuroVector). Isotope analysis was carried out by the Unidad de Técnicas Instrumentales de Análisis (UTIA) of the Servicios de Apoyo a la Investigación (SAI) of University of A Coruña. Samples were combusted in an elemental analyzer FlashEA1112 (ThermoFinnigan) coupled to an isotopic ratio mass spectrometer Deltaplus (ThermoFinnigan). Acetanilide was used as the reference standard for quantifying nitrogen content.

Fig. 3 Seawater temperature (°C) in the growing period of *S. latissima*



Results and discussion

Morphological variables, growth rates, and yield

After 140 days of culture, the final harvest gave an average yield of 20.67 ± 3.19 wet kg m⁻¹ (Table 1). Growth rates (Table 2) show that weight produced the fastest rates followed by blade length and, finally, blade width. Thus, as the blades grow, they become lengthened and heavier as a result of their increased thickness. Maximum growth rate was 11 % for weight gain on the first sampling date, and later, growth rates declined gradually until harvest time. Blade length growth decreased faster, possibly due to deterioration and loss of apical blade fragments near the time of harvest. The sampled specimens had an average weight of 143.28 ± 6.25 g and average length and width of 161.97 ± 4.25 and 17.73 ± 0.55 cm, respectively. Average implant weight at the end of the

experiment was 1879.07 ± 290.76 g (Table 1). Throughout the experiment, we observed a gradual increase in fertile specimens (Table 3). On the first sampling date sporangial sori were detected in 9.3 % of the specimens but reached 93 % at the end. Moreover, epiphyte cover increased very sharply over the last two sampling dates (Table 3). The increase in epiphyte cover coincided with a significant rise in water temperature (Fig. 3) that announces the progressive arrest of the algal growth and the advisability of harvesting.

Previous experiences with this species in Galician waters indicate that the best design for production consists of vertical ropes hanging at 1-m intervals and seeded down to 1 m deep only since larger seeding results in a significant decline in production due to the self-shading and water turbidity (Cremades et al. 2007). The present experiment provides further support to this design as average yield, 20.67 ± 3.19 wet kg m⁻¹, was significantly higher than the 13.1 ± 1.6 wet kg m⁻¹

Table 1 Final yield of *S. latissima* (wet g m⁻¹) and evolution of implant weight (g), blade weight (g), blade length (cm), and blade width (cm) for every sampling date

	Date	n	Mean±standard error	Min.	Max.
Final yield (wet g m ⁻¹)	17 Apr 2010	15	20669.7 ± 3.19	6006.0	47520.0
Implant weight (g)	5 Feb 2010	15	160.533 ± 13.408	92.0	300.0
	10 Mar 2010	15	682.6 ± 97.54	215.0	1690.0
	17 Apr 2010	15	1879.07 ± 290.76	546.0	4320.0
Blade weight (g)	5 Feb 2010	75	15.492 ± 0.754	6.2	36.9
	10 Mar 2010	75	54.508 ± 2.438	12.5	98.5
	17 Apr 2010	75	143.28 ± 6.247	34.0	264.0
Blade length (cm)	5 Feb 2010	75	56.92 ± 1.398	32.0	85.0
	10 Mar 2010	75	112.24 ± 2.41	63.0	152.0
	17 Apr 2010	75	161.907 ± 4.254	80.0	240.0
Blade width (cm)	5 Feb 2010	75	9.16 ± 0.201	6.0	15.0
	10 Mar 2010	75	13.747 ± 0.319	8.0	20.0
	17 Apr 2010	75	17.733 ± 0.551	8.0	28.0

Table 2 Relative growth rates (RGR) of weight of implants and weight, length and width of blades of *S. latissima* for every sampling date

Interval	Variable	X ₀	X _t	t (days)	RGR (%)
27 Nov–5 Feb	implant weight (g)	0.056	160.533	70	11.37
	blade weight (g)	–	–	–	–
	blade length (cm)	1.014	56.92	70	5.75
	blade width (cm)	0.232	9.16	70	5.25
5 Feb–10 Mar	implant weight (g)	160.533	682.6	32	4.52
	blade weight (g)	15.5	54.5	32	3.93
	blade length (cm)	56.92	112.24	32	2.12
	blade width (cm)	9.16	13.74	32	1.27
10 Mar–17 Apr	implant weight (g)	682.6	1879.07	38	2.66
	blade weight (g)	54.5	143.3	38	2.54
	blade length (cm)	112.24	160.78	38	0.95
	blade width (cm)	13.74	17.73	38	0.67

obtained by Cremades et al. (2007) with longer (2 m) ropes under the same conditions. Also, yield clearly surpassed the 6.2 ± 1.5 and 11.7 ± 0.9 wet kg m⁻¹ obtained in horizontal long-line systems at 2-m depth after similar period cultivation in other experiments conducted in the same production area in Galician waters (Peteiro et al. 2006; Peteiro and Freire 2009).

Yield did not change with the location of the ropes in the raft (Table 4). However, yield did change with depth from the second sampling ($p=0.0082$), getting significantly different yields at each depth at harvest time ($p=0.0001$) (Table 5; Fig. 4). Although yield of the deepest implants still was commercially profitable (10.90 ± 1.23 wet kg m⁻¹), vertical stratification was greater in this experiment than that in previous ones (Cremades et al. 2007). A plausible explanation for the greater stratification is that the good development of the higher implants—that yielded excellent average productions of 35.46 ± 4.19 wet kg m⁻¹—may have produced stronger self-shading. However, we cannot rule out the influence of predation by omnivorous or herbivorous fish of the Sparidae family such as salema (*Sarpa salpa*) and bogue (*Boops boops*). These fish predate preferably on the early stages of deeper implants (autumn and early winter) where they eat the middle and distal parts of the seaweed blades without reaching the meristem. This is consistent with studies which point out that feeding activity of both species increases in autumn during

prespawning period (Ruitton et al. 2006). As a result, the algae survive the attack but with a delay in their development due to the loss of most of its assimilatory surface. This phenomenon of predation went unrecorded or was not significant in the earlier experiments of cultivation of *S. latissima* in Galicia that we have been conducting since 2002 (Peteiro and Freire 2012). However, fish predation increases year after year, and it has even forced the abandonment this crop in other parts of the Iberian Peninsula (Asturias and Cantabria) where it is even more aggressive (E.M. Llera, Asturian Center of Fishing Experimentation, pers. com., May 2014). Should the problem persist, appropriate control strategies will be required in a near future.

In Canada, Druehl et al. (1988) reported yields of 8 wet kg m⁻¹ in long-line systems after 8 months in the sea. Also, in Canada, Chopin et al. (2004) got higher mean values between 8.01 and 20.67 wet kg m⁻¹ after 7–9 months in long lines near salmon cages and mussel ropes in IMTA systems. In Scotland, Sanderson et al. (2012) reported yields of 12.4 wet kg m⁻¹ in vertical ropes after 5 months near salmon cages, also in IMTA systems. The high yield reported by Chopin et al. (2004), although similar to the obtained in Spain, required almost twice the time of sea cultivation. Moreover, the maximum sporophyte length obtained by these authors after 278 days of culture was

Table 3 Increase of fertile individuals of *S. latissima* (%) and epiphyte coverage (% of blade) during the growth

	Date	n	Mean±standard error	Min.	Max.
Fertile individuals (%)	5 Feb 2010	75	9.3	–	–
	10 Mar 2010	75	33.3	–	–
	17 Apr 2010	75	93	–	–
Epiphyte coverage(%)	5 Feb 2010	75	1.49±0.27	0	9.3
	10 Mar 2010	75	3.63±0.15	1	6.5
	17 Apr 2010	75	5.26±0.12	3.5	7.5

Table 4 Descriptive statistics and ANOVA analysis of implant weight of *S. latissima* according to the date and spatial location in the raft of the sampling points

Date	Site	n	Mean (g)	p value
5 Feb 2010	1	3	128.333	0.5657
	4	3	148	
	3	3	156.667	
	2	3	167.667	
	5	3	202	
10 Mar 2010	4	3	534	0.8385
	3	3	621.333	
	2	3	625	
	5	3	724.667	
	1	3	908	
17 Apr 2010	3	3	1539	0.9391
	2	3	1567.67	
	5	3	1918.33	
	1	3	2105	
	4	3	2265.33	

160 cm while we got specimens >260 cm long in just 140 days. Therefore, Canadian crops must have reached total yield values close to ours thanks to a higher planting density since they use a continuous system where the seed string is rolled around the culture rope.

Due to temperature constrains, the growing window of *S. latissima* in Northwest Iberian Peninsula cannot exceed 5–6 months—between November and April (Cremades et al. 2007; Peteiro and Freire 2009). Therefore and hypothetically, rise of seawater temperature due to climate change is a troubling issue for the future of this culture in Iberia. But otherwise, it is necessary to indicate the great capacity of *S. latissima* for genotypic adaptation to temperature changes (Heinrich et al. 2012). In Norway, the water temperature during the growth of *S. latissima* varies from 4 to 13.6 °C (Handå et al. 2013), in Scotland from 7 to 15 °C (Sanderson et al. 2012), while in this study varied from 11.2 to 15.7 °C.

However, it is also important to recall that here we obtain similar or even higher yields in just 4.5 months than those obtained in Canada (Chopin et al. 2004) after twice that time, with all that this entails as reduction of production costs and time of space occupation. Moreover, *S. latissima* produces larger plants in Galicia that also have higher commercial quality as evidenced by their larger substantiality value (Kawashima 1984), an Asian index applied to the commercial cultivation of *S. japonica* (“Asian kombu”) for human consumption (Maihr et al. 1991).

Seaweed-mollusc integration

Total nitrogen content and isotope ratio $\delta^{15}\text{N}$ can be used to assess the patterns of nitrogen supply to macroalgae (Huntington and Boyer 2008). Protein content in species of *Laminaria* and *Saccharina* is around 10 % (Chapman and Chapman 1980), whereas the basal level of the isotope ratio $\delta^{15}\text{N}$ in macroalgae from the coast of Galicia is $5.48 \pm 1.18\text{‰}$ (Carballeira et al. 2013). Our samples of *S. latissima* cultivated together with mussel rafts showed much higher mean values, with a protein content of $16.77 \pm 0.50\%$ and $7.92 \pm 0.11\%$ $\delta^{15}\text{N}$ (Table 6).

The value of $\delta^{15}\text{N}$ is similar to that obtained by Carballeira et al. (2011) in other seaweed species belonging to areas affected by eutrophication due to the discharge of effluents from land-based marine fish farms. In our study area, it can be due either to the influence of red seabream (*Pagellus bogaraveo*)-culture cages in a nearby area or to the presence of a moderate degree of eutrophication of anthropic origin.

Protein content decreased evenly along the experiment, probably reflecting differences in the density or more likely in biological activity of the surrounding molluscs that may lose about 74 % of its organic matter in the spawning period between March–April and July–August (Pérez Camacho et al. 1991).

The high protein values observed in cultivated *S. latissima* can only be explained by a series of consecutive events that result from the integration phenomena: (i) ammonium constitutes the major end product of pro-

Table 5 Descriptive statistics and ANOVA analysis of implant weight of *S. latissima* according to the sampling date and implant depth (h. gr.=homogeneous groups)

Date	Depth (m)	n	Mean (g)	h. gr.	p value
5 Feb 2010	0	5	182	X	0.1185
	0.5	5	177.8	X	
	1	5	121.8	X	
10 Mar 2010	0	5	1027.4	X	0.0082*
	0.5	5	654.8	X	
	1	5	365.6	X	
17 Apr 2010	0	5	3223.4	X	0.0001*
	0.5	5	1422.4	X	
	1	5	991.4	X	

*Significant differences, p value < 0,05

Fig. 4 Stratification of yield of *S. latissima* because of depth. On the left implants from surface, on the middle and the right implants from 0.5 m deep and 1 m deep, respectively (photos J. Cremades)



tein and amino acid catabolism in *Mytilus* (Bayne et al. 1976), (ii) passive and linear ammonium uptake rates over a wide range of ammonium concentration have also been reported for several kelps such as *Macrocystis pyrifera* (Haines and Wheeler 1978), *Laminaria groenlandica* (Harrison et al. 1986), *S. latissima*, and *Nereocystis luetkeana* (Ahn et al. 1998) (iii) ammonium uptake by macroalgae is already reduced and can be directly incorporated into amino acids by the formation of glutamine (Mifflin and Lea 1976) while glutamic acid is formed later by a second reaction (Syrett 1981), and (iv) the assimilated nitrogen is in turn incorporated into other amino acids to form proteins by transamination reactions (Lobban and Harrison 1994).

Similar IMTA experiences in the vicinity of salmon cages reported higher yields in cultures of *S. latissima* in compared

to those away from them. These yield increases ranging from 26 % in Scotland (Sanderson et al. 2012) to 46 % in Canada (Chopin et al. 2004). While Chopin et al. (2004) did not mention any change in the nitrogen content, Sanderson et al. (2012) and Handâ et al. (2013), respectively, noted that *S. latissima* has near the fish farms an average of 1.9 and 2.2 % of nitrogen in contrast to the value of 1.23 and 1.5 % in reference sites.

We have not performed similar experiments to assess the benefits of integration in terms of yield. However, given the clear influence of integration on protein content, it seems very likely that our high production values may, to some extent, be another consequence of the integration through the increased availability of inorganic carbon as dissolved CO₂ from mollusc respiration.

Table 6 Protein content of blades of *S. latissima* (%), calculated by multiplying the % N×6.25, MAFF 1975) and $\delta^{15}\text{N}$ for every sampling date

	Date	<i>n</i>	Mean±standard error	Min.	Max.
Protein content (%)	5 Feb 2010	5	18.24±0.24	17.6	19.1
	10 Mar 2010	5	17.78±0.19	17.2	18.4
	17 Apr 2010	5	14.3±0.37	13.4	15.5
	Total	15	16.77±0.50	17.2	19.1
$\delta^{15}\text{N}$	5 Feb 2010	5	8.4±0.1	8.3	8.5
	10 Mar 2010	5	7.72±0.08	7.64	7.8
	17 Apr 2010	5	7.64±0.16	7.47	7.8
	Total	15	7.92±0.11	7.47	8.5

Conclusions

The present study is the first to examine cultivation of macroalgae in integration with mussel rafts in Spain. This study shows that cultivating *S. latissima* in Northwest Iberian Peninsula is fully viable as well as an attractive alternative for developing IMTA systems that might diversify aquaculture while lowering the environmental impact of this activity. The integration of this culture with mussel rafts is very positive, producing protein-rich algal biomass with higher commercial value as feed or food. We have also shown that the seaweed uses ammonium from the molluscs as a nitrogen source, contributing to improving the water quality, but the potential for bioremediation services needs to be assessed taking into account the seasonality of the macroalgae. In this case, the rapid growth of *S. latissima* between late autumn and early spring matches with one of the faster growth seasons of mussels, prior of its summer spawning.

From a phenological point of view, *S. latissima* in culture behaves as a winter species in Northwest Spain with optimum growth between November and April; outside this time frame, the synergistic effects of photoperiod, light intensity, and water temperature become lethal for the seaweed (Heinrich et al. 2012). Other culturing experiences tried to overcome this limitation by lowering the ropes in summer (Peteiro and Freire 2009), but they are hardly viable and totally unprofitable. The same species in culture behaves like a perennial species in other areas of the Atlantic where most of the growth takes place in Spring. Nonetheless, the narrow time frame for cultivation in Northwest Spain is offset by a high productivity, achieving yields similar or larger than those recorded in other coasts but in almost half the time.

Besides getting higher yield and quality than previous studies, the vertical farming design proposed here is safer, more versatile, and has lower maintenance costs than traditional long-line horizontal systems. The main difference is that culture ropes in our design are not a structural element of the raft. Moreover, the double-line surface system is more secure against accidents or breakage; it also has the added benefit that it is hardly colonized by fouling species and can be self-cleaning by sun with only flipping the line after the growing season.

On the other hand, this seaweed farming system in short vertical ropes and Japanese seed method obviously has higher costs of labor time than continuous seeding systems in long horizontal ropes used in another North Atlantic coast. However, in NW Spain, seaweed cultures must necessarily be developed by law in the available administrative concessions within mussel farming rafts. In these concessions, seaweed farming sites usually cannot exceed 2500-m² grids, where the system of seeding in small independent vertical strings is more versatile and resembling the traditional handling of mussel farming on rafts. This system allows a sustained harvest

time so it is well suited to the marketing of sugar kelp in fresh for human direct food, a destination where it reaches a high commercial value. Furthermore, the use of small seeded segments (implants), although more laborious, saves seed string, reduces intraspecific competition, and permits to obtain similar yields per meter of rope than in continuous seeded ropes, but with larger individuals of better commercial quality index. The future of these crops may be compromised only by early epiphytes and predation processes, events that deserve further research to develop a minimizing strategy.

Acknowledgments We thank PORTO-MUIÑOS Ltd., edible seaweed selling company (A Coruña, Galicia) for the facilities provided to carry out this work. We thank also Prof. A. Carballeira (University of Santiago de Compostela, Spain) for his invaluable help in interpreting the results of isotope analyses. This study was conducted within the Marine Culture National Plan “Integrated Aquaculture: Pilot experience for multi-trophic aquaculture development” (2008–2011) financed by National Advisory Board for Mariculture (JACUMAR). Ministry of Environment and Rural and Marine Environment, Government of Spain.

References

- Ahn O, Petrell RJ, Ahn O, Petrell RJ, Harrison PJ (1998) Ammonium and nitrate uptake by *Saccharinalatissima* and *Nereocystisluetkeana* originating from a salmon sea cage farm. J Appl Phycol 10:333–340
- APROMAR (2013) La acuicultura marina en España. APROMAR. www.apromar.es/Informes. Accessed 10 Jan 2014
- Barrington K, Chopin T, Robinson S (2009) Integrated multi-trophic aquaculture (IMTA) in marine temperate waters. In: Soto D (ed) Integratedmariculture: a global review. FAO Fisheries and Aquaculture Technical Paper, No. 529, Rome, FAO, p 7–46
- Bayne BL, Widdows J, Thompson RJ (1976) Physiology II. In: Bayne BL (ed) Marine mussels: their ecology and physiology. Cambridge University Press, Cambridge, pp 207–260
- Bixler HJ, Porse H (2012) A decade of change in the seaweed hydrocolloids industry. J Appl Phycol 23:321–335
- Brinkhuis BH, Mariani EC, Breda VA, Brady-Campbell MM (1984) Cultivation of *Laminaria sacharina* in the New York Marine Biomass Program. Hydrobiologia 116(117):177–266
- Buck BH, Buchholz CM (2004) The offshore-ring: a new system design for the open ocean aquaculture of macroalgae. J Appl Phycol 16: 355–368
- Cabanas JM, González JJ, Mariño J, Pérez A, Román G (1979) Estudio delmejillon y de su epifauna en los cultivos flotantes de la Ría de Arosa. III. Observaciones previas sobre la retención de partículas y la biodeposición de una batea. Bol Inst Esp Oceanogr 5:43–50 (in Spanish)
- Carballeira C, Espinosa J, Carballeira A (2011) Linking $\delta^{15}\text{N}$ and histopathological effects in molluscs exposed *in situ* to effluents from land-based marine fish farms. Mar Pollut Bull 62:2633–2641
- Carballeira C, Viana IG, Carballeira A (2013) $\delta^{15}\text{N}$ values of macroalgae as an indicator of the potential presence of waste disposal from land-based marine fish farms. J Appl Phycol 25:97–107
- Chapman VJ, Chapman DJ (1980) Seaweeds and their uses. Chapman and Hall, London, 334 pp
- Chopin T, Robinson S, Sawhney M, Bastarache S, Belyea E, Shea R, Armstrong W, Stewart I, Fitzgerald P (2004) The AquaNet integrated multi-trophic aquaculture project: rationale of the project and

- development of kelp cultivation as the inorganic extractive component of the system. *Bull Aquac Assoc Can* 104:11–18
- Cremades J, Freire Ó, Baamonde S, Salinas JM, Fustes C (2007) Nuevo método para el cultivo industrial de *Laminaria saccharina* (Laminariales, Phaeophyta) en las costas gallegas. In: Cerviño Eiroa A, Guerra Díaz A, Pérez Acosta C (eds) Proceedings of the XI Congreso Nacional de Acuicultura, Consellería de Pesca e Asuntos Marítimos, Xunta de Galicia, Vigo, Spain, p 559–562 (in Spanish)
- de Castro M, Gómez-Gesteira M, Prego R, Taboada JJ, Montero P, Herbello P, Pérez-Villar V (2000) Wind and tidal influence on water circulation in a Galician ria (NW Spain). *Estuar Coast Shelf Sci* 51: 161–176
- Druehl LD, Baird R, Lindwall A, Lloyd KE, Pakula S (1988) Longline cultivation of some Laminariaceae in British Columbia, Canada. *Aquacult Fish Manag* 19:253–263
- Gómez Pinchetti JL, Suárez Álvarez S, Güenaga Unzetabarrenechea L, Figueroa FL, García Reina G (2011) Posibilidades para el desarrollo de sistemas integrados con macroalgas en las Islas Canarias y su entorno. In: Macroalgas en la Acuicultura Multitrófica Integrada Peninsular. Valorización de su Biomasa. Centro Tecnológico del Mar, Fundación CETMAR, Vigo (Spain), p 75–93 (in Spanish)
- Guiry M, Blunden G (1992) Seaweed resources in Europe: uses and potential. John Wiley, Chichester, 432 pp
- Haines KC, Wheeler PA (1978) Ammonium and nitrate uptake by the marine macrophytes *Hypnea musciformis* (Rhodophyta) and *Macrocystis pyrifera* (Phaeophyta). *J Phycol* 14:319–324
- Handá A, Forbord S, Wang X, Broch OJ, Dahle SW, Størseth TR, Reitan KI, Olsen Y, Skjermo J (2013) Seasonal- and depth-dependent growth of cultivated kelp (*Saccharina latissima*) in close proximity to salmon (*Salmo salar*) aquaculture in Norway. *Aquaculture* 414–415:191–201
- Harrison PJ, Druehl LD, Lloyd KE, Thompson PA (1986) Nitrogen uptake kinetics in three year-classes of *Laminaria groenlandica* (Laminariales: Phaeophyta). *Mar Biol* 93:29–35
- Heinrich S, Valentin K, Frickenhaus S, John U, Wiencke C (2012) Transcriptomic analysis of acclimation to temperature and light stress in *Saccharina latissima* (Phaeophyceae). *PLoS ONE* 7(8):e44342
- Hernández I, Martínez-Aragón JF, Tovar A, Pérez-Lloréns JL, Vergara JJ (2002) Biofiltering efficiency in removal of dissolved nutrients by three species of estuarine macroalgae cultivated with sea bass (*Dicentrarchus labrax*) waste waters 2. Ammonium. *J Appl Phycol* 14:375–384
- Hernández I, Pérez-Pastor A, Vergara J, Martínez-Aragón J, Fernández-Engo MÁ, Pérez-Lloréns JL (2006) Studies on the biofiltration capacity of *Gracilariopsis longissima*: from microscale to macroscale. *Aquaculture* 252:43–53
- Hunt R (1982) Plant growth curves: the functional approach to plant growth analysis. Edward Arnold, London, 248 pp
- Huntington BE, Boyer KE (2008) Evaluating patterns of nitrogen supply using macroalgal tissue content and stable isotopic signatures in Tomales Bay, CA. *Environ Bioindic* 3:180–192
- Jiménez del Río M, Ramazanov Z, García-Reina G (1994) Optimization of yield and biofiltering efficiencies of *Ulva rigida* C. Ag. cultivated with *Sparus aurata* L. waste waters. *Sci Mar* 58:329–335
- Jiménez del Río M, Ramazanov Z, García-Reina G (1996) *Ulva rigida* (Ulvales, Chlorophyta) tank culture as biofilters for dissolved inorganic nitrogen from fishpond effluents. *Hydrobiologia* 326/327: 61–65
- Kain (Jones) JM, Holt TJ, Dawes CP (1990) European Laminariales and their cultivation. In: Yarish C, Penniman CA, Van Petten P (eds) Economically important plants of the Atlantic: their biology and cultivation. Connecticut Sea Grant College Program, University of Connecticut, Groton, pp 95–111
- Kawashima S (1984) Kombu cultivations in Japan for human foodstuff. *Jpn J Phycol* 32:379–394
- Lobban CS, Harrison PJ (1994) Seaweed ecology and physiology. Cambridge University Press, Cambridge, 366 pp
- Lüning K (1979) Growth strategies of three *Laminaria* species (Phaeophyceae) inhabiting different depth zones in the sublittoral region of Helgoland (North Sea). *Mar Ecol Prog Ser* 1:195–207
- Macías JC, Aguado F, González N, Guerrero S, Estévez A, Valencia JM, Cremades J (2008) Acuicultura Integrada: desarrollo de experiencias de cultivos multitróficos en la costa española. In: Rey-Méndez M, Lodeiros C, Fernández Casal J, Guerra A (eds) Foro Ac. Rec. Mar. Rías Gal. 10, p 483–490 (in Spanish)
- MAFF (1975) Energy allowances and feeding systems for ruminants. Technical Bulletin 33. Ministry of Agriculture, Fisheries and Food. HMSO, London
- Maihr OP, Ohno M, Matsuoka M (1991) Culture of brown alga *Laminaria japonica* (Phaeophyta, Laminariales) in warm waters of Shikoku, Japan. *Indian J Mar Sci* 20:55–60
- Martínez-Aragón JF, Hernández I, Pérez-Lloréns JL, Vázquez R, Vergara JJ (2002) Biofiltering efficiency in removal of dissolved nutrients by three species of estuarine macroalgae cultivated with sea bass (*Dicentrarchus labrax*) waste waters. 1. Phosphate. *J Appl Phycol* 14:365–374
- Mifflin BJ, Lea PJ (1976) The pathway of nitrogen assimilation in plants. *Phytochemistry* 15:873–885
- Pérez Camacho A, González R, Fuentes J (1991) Mussel culture in Galicia (N.W. Spain). *Aquaculture* 94:263–278
- Perez R, Kaas R, Campello F, Arbault S, Barbaroux O (1992) La culture des algues marines dans le monde. Service de la Documentation et des Publications (SDP). IFREMER, Plouzane, France. 614 pp. (in French)
- Peteiro C, Freire Ó (2009) Effect of outplanting time on commercial cultivation of kelp *Laminaria saccharina* at the southern limit in the Atlantic coast, N.W Spain. *Chin J Oceanol Limnol* 27:54–60
- Peteiro C, Freire Ó (2012) Observations on fish grazing of the cultured kelps *Undaria pinnatifida* and *Saccharina latissima* (Phaeophyceae, Laminariales) in Spanish Atlantic waters. *AACL Bioflux* 5(4):189–196
- Peteiro C, Salinas JM, Freire Ó, Fustes C (2006) Cultivation of the autoctonous seaweed *Laminaria saccharina* off the Galician coast (NW Spain): production and features of the sporophytes for an annual and biennial harvest. *Thalassas* 22:45–53
- Petrell RJ, Alie SY (1996) Integrated cultivation of salmonids and seaweeds in open systems. *Hydrobiologia* 326/327:67–73
- Ruitton S, Verlaque M, Aubin G, Boudouresque CF (2006) Grazing on *Caulerpa racemosa* var. *cylindracea* (Caulerpaceae, Chlorophyta) in the Mediterranean Sea by herbivorous fishes and sea urchins. *Vie et Milieu* 56:33–41
- Salinas Morondo JM (2011) Cultivo de laminariales y acuicultura multitrófica. In: Macroalgas en la Acuicultura Multitrófica Integrada Peninsular. Valorización de su Biomasa. Centro Tecnológico del Mar, Fundación CETMAR, Vigo (Spain), p 29–51 (in Spanish)
- Sanderson JC, Dring MJ, Davidson K, Kelly MS (2012) Culture, yield and bioremediation potential of *Palmaria palmata* (Linnaeus) Weber & Mohr and *Saccharina latissima* (Linnaeus) C.E. Lane, C. Mayes, Druehl & G.W. Saunders adjacent to fish farm cages in northwest Scotland. *Aquaculture* 354–355:128–135
- Subandar A, Petrell RJ, Harrison PJ (1993) *Laminaria* culture for reduction of dissolved inorganic nitrogen in salmon farm effluent. *J Appl Phycol* 5:455–463
- Syrett PJ (1981) Nitrogen metabolism of microalgae. *Can Bull Fish Aquat Sci* 210:182–210

